

Н.А. Калинин, Е.В. Попова

ЧИСЛЕННЫЙ ПРОГНОЗ ОПАСНЫХ И НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ СНЕГОПАДОВ В ПЕРМСКОМ КРАЕ 15–16 МАРТА 2013 ГОДА

N.A. Kalinin, E.V. Popova

THE NUMERICAL FORECAST OF THE DANGEROUS AND UNFAVORABLE SNOWFALLS IN THE PERM REGION 15–16 MARCH 2013

Рассматривается применение численной мезомасштабной модели WRF-ARW для прогнозирования опасных и неблагоприятных явлений на территории Пермского края. В качестве примера выбран случай сильного и очень сильного снегопада в северных районах края в марте 2013 г. Описаны синоптические условия, выявлены особенности и причины формирования интенсивных снегопадов, произведены расчеты с помощью модели и выполнена оценка успешности прогноза осадков.

Ключевые слова: модель WRF-ARW, опасные явления погоды, снегопад, численный прогноз погоды.

The application of numerical mesoscale model WRF-ARW for predicting dangerous and adverse events in the Perm region. As an example, selected case is very strong and heavy snowfall in the northern areas of the region in March 2013. Describes the synoptic conditions, peculiarities and causes the formation of the intense snowfalls, the calculations using the model and evaluate the success of precipitation forecast.

Key words: WRF-ARW model, dangerous weather phenomena, snowfall, numerical weather forecast.

Введение

Изучение условий формирования неблагоприятных и опасных явлений имеет важное практическое значение для всех отраслей экономики. В холодный период года к неблагоприятным и опасным явлениям погоды относятся сильные и очень сильные снегопады с количеством осадков более 6 и 20 мм соответственно, выпавших за 12 ч, предупреждение которых с высокой точностью и заблаговременностью остается одной из сложнейших и актуальнейших задач. В оперативной работе отдела метеорологических прогнозов Пермского ЦГМС – филиал ФГБУ «Уральское УГМС» для прогноза осадков используются результаты расчета глобальных моделей от прогностических центров Москвы, Вашингтона, Брекнелла и Рединга. Данные в коде GRIB поступают в разрешении 2,5°, что не позволяет использовать их для

прогнозирования погодных условий в малых масштабах. Несмотря на достижения в физическом понимании процессов, происходящих в атмосфере, рост производительности вычислительных систем, улучшение скорости сбора и качества наблюдений, отмечающиеся в последнее десятилетие, до сих пор основным методом прогноза осадков остается синоптический. Основная цель данного исследования состоит в том, чтобы получить начальную информацию о качестве краткосрочных прогнозов сильных и очень сильных снегопадов с помощью модели WRF для территории Пермского края с последующим применением данных счета модели в оперативной практике синоптиков.

Эволюция барического образования

Циклон, принесший обильные снегопады в Пермский край, сформировался над Северной Италией в 0 ч Всемирного согласованного времени (ВСВ) 13 марта 2013 г. Его центр на приземной карте погоды был очерчен одной замкнутой изобарой диаметром около 850 км и прослеживался только до поверхности 925 гПа. Минимальное давление в центре составило 996,6 гПа. Приземный центр находился на антициклональной стороне высотной фронтальной зоны в передней части высотной ложбины, ось которой проходила через мыс Канин Нос—Париж—Мадрид. Затем ось ложбины сместилась с северо-запада на юго-восток со скоростью 6 м/с и на синоптической карте AT_{500} в 0 ч ВСВ 16 марта проходила по линии Архангельск—Санкт-Петербург—Варшава. В это же время началась перестройка зонального процесса на меридиональный.

В первые сутки циклон перемещался с северо-запада на юго-восток согласно ведущему потоку, скорость которого на изобарической поверхности 500 гПа составила около 15–20 м/с (рис. 1). В последующие сутки за счет интенсивного циклогенеза (величина динамического падения давления над приземным центром составила 22 дам/24 ч) направление ведущего потока изменилось на западное, а в дальнейшем на юго-западное. В свою очередь, скорость ветра в средней тропосфере увеличилась до 35–40 м/с. Циклон, являясь средним барическим образованием, достиг стадии максимального развития к 18 ч ВСВ 15 марта в районе Гомеля. Минимальное давление в центре составило 980,7 гПа. Медленно смещаясь, к 9 ч ВСВ 16 марта циклон достиг Москвы, заполняясь в течение суток 17 марта над Кировской областью. Однако связанная с ним мощная облачная система прослеживалась по космическим снимкам и в Ханты-Мансийском автономном округе.

Синоптическая ситуация 15–16 марта

Перемещение средиземноморского циклона над Восточной Европой и Европейской территорией России сопровождалось выносом значительных запасов теплого и влажного воздуха, выпадением как твердых, так и жидких осадков. С данным барическим образованием была связана система полярного фронта, представленного северной и южной ветвями, теплые участки которых разделены расстоянием в 350 км (рис. 2).

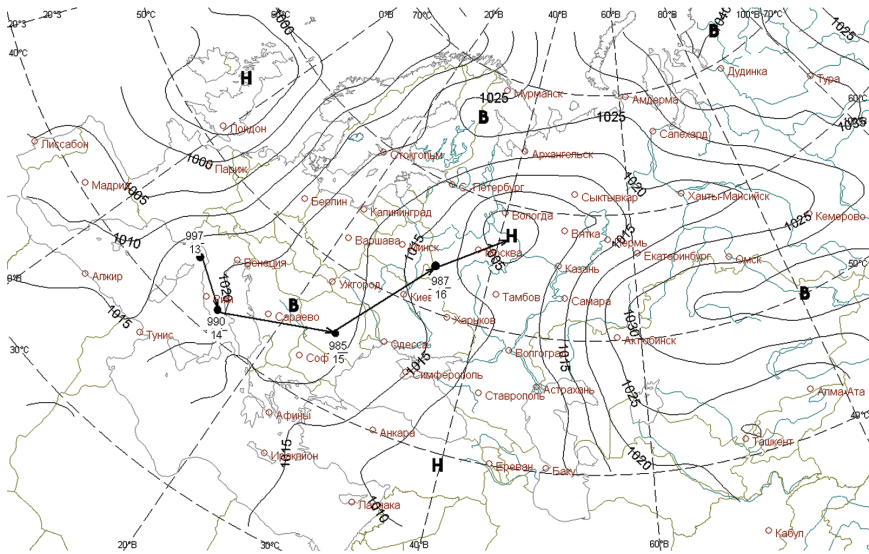


Рис. 1. Схема барического поля у земли 17 марта 2013 г.

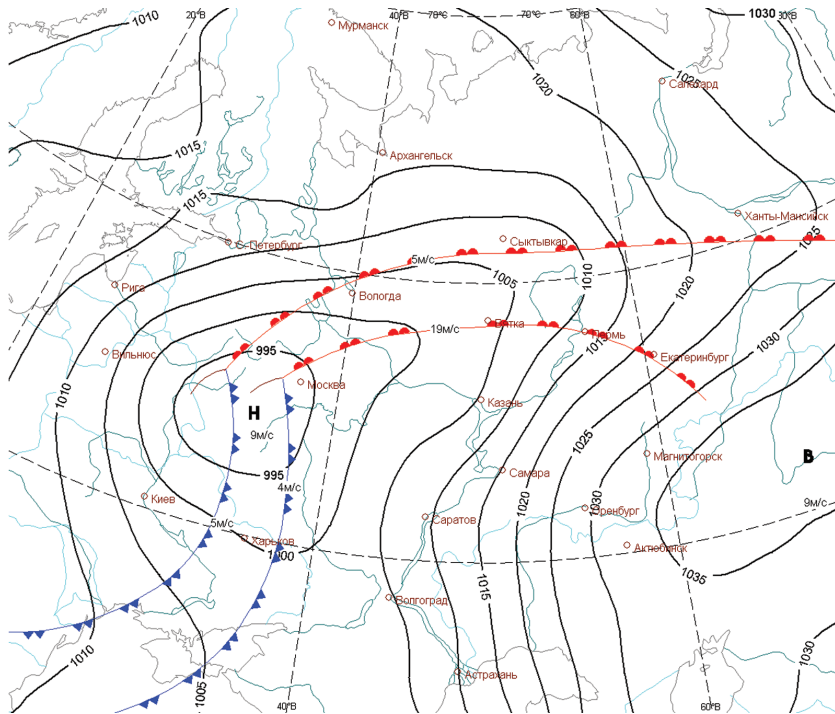


Рис. 2. Кольцевая карта погоды 9 ч ВСВ 16 марта 2013 г.

Днем 15 марта в Пермском крае, под влиянием вытягивающейся ложбины с теплым участком северной ветви полярного фронта, по северу прошли умеренные и сильные снегопады до 9 мм. В течение суток 16 марта теплый участок северной ветви полярного фронта был ориентирован с юго-запада на северо-восток в районе городов Смоленск–Вологда–Ныроб. Температурный контраст в зоне фронта над северными районами Пермского края составлял 5,5–6,5 °С /100 км. При этом контраст температуры на карте OT_{1000}^{500} достиг 18 °С/1000 км. Значения барической тенденции перед теплым фронтом достигали –5,4 гПа/12ч. Прошли умеренные и сильные осадки, которые днем при максимальной температуре воздуха 0...+2 °С продолжили выпадать в виде снега. За полусуточные интервалы выпало от 6 до 26 мм, а прирост высоты снежного покрова составил от 3 до 17 см. Снегопад, прошедший днем 16 марта в Ныробе, достиг критерия опасного явления. Количество выпавших осадков составило 118 % месячной нормы. Снегопад такой интенсивности на метеорологической станции зафиксирован впервые за последние 43 года наблюдений. В южных и центральных районах под влиянием теплого участка южной ветви полярного фронта наблюдались небольшие и умеренные осадки в виде снега, днем переходящие в дождь (максимальная температура воздуха составила +1...+6 °С), слабые гололедные явления и усиление ветра до 17 м/с.

Описание применяемой модели

Глобальные модели атмосферы даже при высоком пространственно-временном разрешении в настоящий момент не учитывают все локальные особенности территорий, по которым составляется прогноз. Мировые метеорологические центры не обладают полным набором данных, имеющихся у региональных служб, которые могут привлекать дополнительные автоматические комплексы зондирования и наблюдения. В то же время региональные метеослужбы имеют гораздо больше информации о географических особенностях обслуживаемых ими регионов. Тем не менее, применение в повседневной практике мезомасштабных моделей, например MM5 (Mesoscale Model, version 5) [4] и WRF (Weather Research and Forecasting) [3], позволяющих более точно воспроизводить процессы в мелких масштабах, является необходимым для прогнозирования опасных явлений погоды. Применение модели WRF разных версий позволяет создавать довольно точные прогнозы с оправдываемостью 70–90 % в зависимости от метеовеличин [1]. Модель WRF – численная мезомасштабная система прогнозирования погоды следующего поколения (после MM5, созданной в 1971 г.), разработанная как для оперативного прогнозирования, так и для исследовательских целей. Ее отличительными чертами являются несколько динамических ядер, трехмерная система усвоения данных и программная архитектура, нацеленная на параллельность вычислений и расширяемость системы [3].

В данном исследовании в качестве главного инструмента расчета использована негидростатическая модель WRF в варианте ARW. Модель ARW базируется на негидростатических уравнениях для сжимаемой жидкости, записанных в декартовых координатах по горизонтали и с использованием орографической координаты, которая напоминает сигма-координату, но отличается от нее тем, что она определяется

не через полное давление, а через его гидростатическую составляющую. Расчеты в модели ARW производятся в параллелепипеде, основание которого касается сферической Земли, а оси декартовых координат в точке касания ориентированы по меридиану и кругу широты. Расчеты могут производиться на серии вложенных сеток. Вложения могут производиться только в горизонтальной плоскости, поэтому по вертикали область расчетов должна быть одинаковой на всех сетках. Вложенные сетки должны быть ориентированы точно так же, как и материнская сетка и, наконец, шаг каждой дочерней сетки должен быть в целое число раз меньше, чем шаг родительской сетки. Имеется также возможность решения задачи на подвижной сетке. Для пространственной дискретизации используется сетка *C* по классификации Аракавы (т.е. объемная ячейка задается прямоугольным параллелепипедом; все скалярные величины задаются в его центре, а компоненты векторов в центрах соответствующих граней).

Для модели предлагается библиотека различных параметризаций процессов в пограничном слое атмосферы, формирования облачности и осадков, явлений конвекции и турбулентности. При интегрировании уравнений гидродинамики используется расщепление по направлениям (в горизонтальных направлениях применяется явная схема, а при вычислении вертикальных потоков и скоростей — неявная) и по физическим процессам. WRF является региональной моделью, поэтому для ее инициализации и задания граничных условий необходимы результаты расчетов глобальной модели численного прогноза погоды. Цикл работы модели WRF состоит из подготовки данных, включая их горизонтальную и вертикальную интерполяцию на сетку модели [3].

При моделировании погодных условий 15–16 марта использовались следующие настройки модели WRF-ARW V3.1.1:

- микрофизика — схема Томпсона;
- длинноволновая радиация — RRTM (Rapid Radiative Transfer Model);
- коротковолновая радиация — схема Дадхайи (Dudhia);
- приземный слой — схема Монины-Обухова с вязким подслоем Карлсона-Боланда и стандартными функциями подобия;
- подстилающая поверхность и почва — модель NOAH;
- пограничный слой — схема YSU (Yonsei State University, Южная Корея);
- параметризация кучевой облачности — схема Каина-Фритша;
- при горизонтальном шаге сетки в 10 км шаг по времени установлен в 180 мин. Расчет на 48 ч от срока 0 ч ВСВ 15 марта 2013.

Анализ результатов моделирования

Модельное значение для конкретной метеостанции можно получить двумя способами: 1. Значение в ближайшем узле сетки (максимальное расстояние не более 7 км); 2. Значение, полученное путем интерполяции. Значения, полученные разными способами, отличаются друг от друга в среднем на 2,5 % (табл. 1).

Количество осадков (мм) для метеостанций Пермского края по результатам счета модели WRF-ARW 15–16 марта 2013 г.

Название метеостанции	Прогноз на 15 ч ВСВ		Прогноз на 27 ч ВСВ		Прогноз на 39 ч ВСВ	
	узел	интерполяция	узел	интерполяция	узел	интерполяция
Усть-Черная	2,6	3,0	9,6	8,2	4,8	5,8
Гайны	3,9	4,0	7,6	7,5	5,1	5,2
Ныроб	4,1	4,0	4,9	4,7	8	7,9
Вая	3,9	4,0	4,6	4,4	9,1	8,9
Чердынь	4,5	4,0	5,9	6,1	7,9	7,8
Коса	3,8	4,0	8,3	8,2	7,2	7,2
Кочевое	3,9	4,0	9,7	9,7	7,5	7,5
Березники	3,8	4,0	8,1	8,2	12,7	13,5
Кудымкар	3,5	4,0	7,5	7,1	10,2	10,1
Чермоз	2,1	2,0	5,4	5,5	12,5	12,4
Губаха	2,3	2,0	6,1	6,3	18,2	17,5
Бисер	0,9	1,0	3,9	4,2	10,2	11,6
Добрянка	0,8	1,0	4	4,2	11,7	11,5
Верещагино	0,5	0,5	4,3	4,4	7,6	7,4
Пермь	0,1	0,1	3,2	3	3,5	3,7
Лысьва	0,1	0,0	2,3	2,4	4,1	4,1
Кын	1,9	0,0	4,5	0,6	4,4	4,5
Большая Соснова	0,0	0,1	2,2	2,4	4,2	4,4
Ножовка	0,0	0,0	0,1	1,6	2,8	1,5
Оханск	0,0	0,0	1,4	0,1	4	5,4
Оса	0,0	0,0	0,3	0,2	2,4	2,5
Кунгур	0,0	0,0	0,1	0,1	1,7	1,8
Чайковский	0,0	0,0	0,5	0,0	2,5	2,9
Чернушка	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	2,2
Октябрьский	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,7
Среднее значение	1,7	1,7	4,2	4,0	6,6	6,7
Отклонение, %	0		5		2	

Проверочным материалом результата моделирования осадков служили данные измерений на сети метеорологических станций. В связи с тем, что измерение осадков на метеостанциях проводится 2 раза в сутки (в 3 и 15 ч ВСВ), а выходная продукция из модели получается каждые 3 ч, то для анализа использовались результаты счета за 15, 27 и 39 ч ВСВ от срока 0 ч ВСВ 15 марта. Сравнение модельных и фактических

значений количества осадков проводилось на полусуточном интервале, оценка прогноза осуществлялась по градациям небольшой снег 0–1 мм, умеренный снег 2–5 мм, сильный снег 6–19 мм, очень сильный снег 20 мм и более согласно [6]. Попадание в градацию оценивается на 100 %, завышение/занижение значений на одну градацию – 50 %, завышение/занижение значений на две градации – 0 % (табл. 2).

Таблица 2

Оценка прогноза (%) количества осадков на 15, 27, 39 ч от срока 0 ч 15 марта

Название метеостанции	Прогноз на 15 ч ВСВ		Прогноз на 27 ч ВСВ		Прогноз на 39 ч ВСВ	
	узел	интерполяция	узел	интерполяция	узел	интерполяция
Усть-Черная	100	100	100	100	50	100
Гайны	100	100	100	100	50	50
Нырбоб	100	100	100	100	50	50
Вая	100	100	100	100	100	100
Чердынь	50	50	100	100	100	100
Коса	100	100	100	100	100	100
Кочевое	100	100	100	100	100	100
Березники	100	100	100	100	100	100
Кудымкар	100	100	50	50	100	100
Чермоз	50	50	100	50	50	50
Губаха	100	100	50	50	50	50
Бисер	100	50	100	100	50	50
Добрянка	50	50	100	100	50	50
Верещагино	50	50	100	100	50	50
Пермь	100	100	100	100	50	50
Лысьва	50	100	100	100	100	100
Кын	0	100	100	50	50	50
Большая Соснова	100	50	100	100	50	50
Ножовка	100	100	50	0	50	100
Оханск	100	100	100	100	100	50
Оса	100	100	100	100	50	50
Кунгур	100	100	100	100	0	0
Чайковский	100	100	50	100	50	50
Чернушка	100	100	100	100	50	50
Октябрьский	100	100	100	100	100	100
Среднее	86	88	92	88	66	68

В целом оценка прогноза осадков на 15 ч составила 87 %, на 27 ч – 90 %, на 39 ч – 67 %.

При сравнении прогностических полей осадков с фактическими данными использовались следующие статистические характеристики:

1. $T = n_{11}/n_{01} - n_{12}/n_{02}$ – величина критерия Пирси-Обухова, характеризующая успешность совпадения прогностических и фактических зон осадков (при идеальном прогнозе $T = 1$, при абсолютно некорректном прогнозе $T = -1$).
2. $U = (n_{11} + n_{22})/n_{00}$ – общая оправдываемость прогноза, характеризующая процент успешных прогнозов.
3. $U_0 = n_{11}/n_{10}$ – оправдываемость прогноза наличия осадков, характеризующая процент успешных прогнозов наличия осадков.
4. $U_{\text{БО}} = n_{22}/n_{20}$ – оправдываемость прогноза отсутствия осадков, характеризующая процент успешных прогнозов отсутствия осадков.
5. $\Pi_0 = n_{11}/n_{01}$ – предупрежденность прогноза наличия осадков, характеризующая процент успешно предсказанных случаев выпадения осадков.
6. $\Pi_{\text{БО}} = n_{22}/n_{02}$ – предупрежденность прогноза отсутствия осадков, характеризующая процент успешно предсказанных случаев отсутствия осадков.

Здесь n_{11} – число случаев, когда осадки прогнозировались и наблюдались; n_{12} – число случаев, когда осадки прогнозировались, но не наблюдались; n_{21} – число случаев, когда прогнозировалось отсутствие осадков, а они наблюдались; n_{22} – число случаев, когда прогнозировалось отсутствие осадков и они не наблюдались; $n_{10} = n_{11} + n_{12}$ – общее число точек, в которых прогнозировались осадки; $n_{01} = n_{11} + n_{21}$ – общее число точек, в которых наблюдались осадки; $n_{20} = n_{21} + n_{22}$ – общее число точек, в которых прогнозировалось отсутствие осадков; $n_{02} = n_{12} + n_{22}$ – общее число точек, в которых осадки не наблюдались; n_{00} – общее число оцениваемых точек.

$$7. \quad \delta Q = \frac{1}{n_{00}} \sum_{i=1}^{n_{00}} (Q_{\text{П}}(i) - Q_{\text{Ф}}(i)) - \text{превышение среднего прогностического количества}$$

осадков над фактическим, где $Q_{\text{П}}$ – прогностическое количество осадков, $Q_{\text{Ф}}$ – фактическое количество осадков.

$$8. \quad \sigma_Q = \sqrt{\frac{1}{n_{00}} \sum_{i=1}^{n_{00}} (Q_{\text{П}}(i) - Q_{\text{Ф}}(i))^2} - \text{среднеквадратичная ошибка прогноза осадков}$$

по сравнению с фактом.

9. $P_{<3} = n_{<3}/n_{00}$ – надежность количественного прогноза осадков, характеризующая процент случаев, в которых расхождение между прогностическим количеством осадков и фактическим не превышает 3 мм. Здесь $n_{<3}$ – число случаев, в которых расхождение между прогностическим и фактическим количеством осадков составляет менее 3 мм.

Общая оправдываемость прогноза (U) составляет 84–88 %, 92–96 % и 96 % при заблаговременности 15, 27 и 39 ч соответственно, оправдываемость прогноза наличия осадков (U_0) мало отличается от общей оправдываемости – 76–81 %, 92–96 % и 96 % соответственно. Оправдываемость прогнозов на 15 ч ниже всех в силу преувеличенной области распространения прогностических осадков. Процент успешных прогнозов выше при использовании интерполированных значений. Предупрежденность прогноза наличия осадков (Π_0) достигает 100 %. На первые сутки оправдываемость прогноза

отсутствия осадков ($U_{\text{БО}}$) 100 %, предупрежденность прогноза отсутствия осадков ($\Pi_{\text{БО}}$) при использовании значений осадков в узле модельной сетки составляет 50–67 % и 75 % при интерполяции значений. При прогнозе на 39 ч $U_{\text{БО}}$ и $\Pi_{\text{БО}}$ равны 0 %, т.е. не было ни одного пункта, где модель прогнозировала бы условия без осадков, в то время как фактически на юго-востоке рассматриваемой территории отмечалась область свободная от осадков.

Величины критерия Пирси-Обухова (T), рассчитанные для территории Пермского края, показали, что качество прогноза зон осадков ухудшается с увеличением заблаговременности прогноза (рис. 3). Уровень оценок составляет от 0,0 до 0,8. В зависимости от способа получения прогностических значений осадков, качество прогноза пространственного распределения осадков при прогнозе на 39 ч понижается до уровня $T = 0,0$. Значения осадков, полученные путем интерполяции, обеспечивают наилучшее совпадение зон осадков при прогнозе на 15 и 27 ч с одинаковым уровнем оценки в $T = 0,8$.

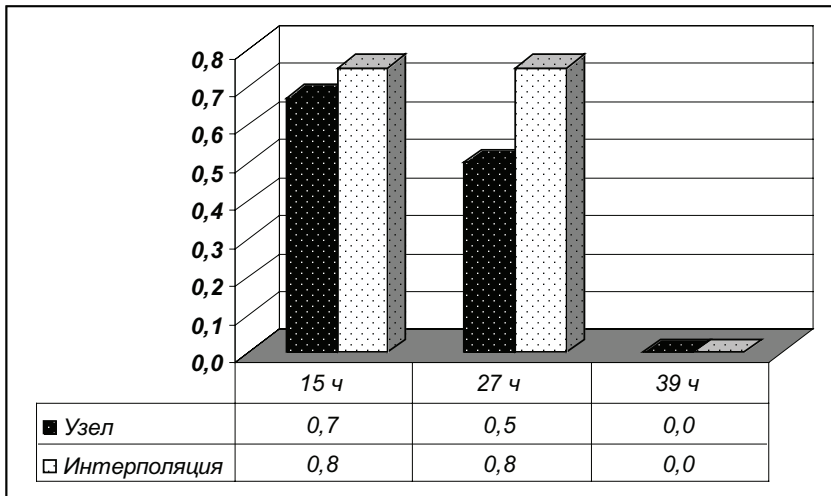


Рис. 3. Величина критерия Пирси-Обухова в зависимости от заблаговременности прогноза.

Величина надежности количественного прогноза осадков ($P_{<3}$) составляет 90–100 % с заблаговременностью 15 и 27 ч, причем данные полученные путем интерполяции более надежны. Существенно ниже надежность прогноза на 39 ч – 40 %. Величина надежности прогноза осадков оказывается более низкой, что свидетельствует о завышении рассчитанного количества осадков и несовпадения областей осадков разной интенсивности. Например, днем 16 марта (что соответствует прогнозу на 39 ч) в центральных и южных районах наблюдались небольшие и умеренные осадки до 5 мм, в то время как по расчетам модели прогнозировались сильные осадки до 18 мм. В северных районах, например в Ныроб, должно было выпасть 8 мм, вместо 26 мм зафиксированных. Максимальная величина количества осадков, рассчитанная моделью,

составила 18,2 мм и относилась к МС Губаха. Модельная зона осадков наибольшей интенсивности оказалась на 200 км южнее фактической. Снегопад опасной величины модель не воспроизвела.

Величина среднеквадратичной ошибки σ_Q изменяется от 0,9 до 6,5, а величина абсолютной ошибки δQ от 0,2 до 0,9. В среднем по Пермскому краю модель завышает количество осадков при прогнозе на первые сутки на 20–30 %, при прогнозе на 39 ч – на 165 %.

Вывод

Модель WRF-ARW успешно воспроизводит выпадение небольших, умеренных и сильных снегопадов. Более надежны значения осадков, полученные путем интерполяции модельных данных. В среднем по исследуемой территории модель завышает значения осадков. При прогнозе на 39 ч модель неверно рассчитала область осадков наибольшей интенсивности, что могло быть вызвано ошибками в начальных условиях.

Литература

1. *Багров А.Н.* Сравнительная оценка успешности прогнозов элементов погоды на основе ряда отечественных и зарубежных моделей атмосферы различного масштаба. // Информ. сб. № 35. – М.: Гидрометеоздат, 2007, с. 3–20.
2. *Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д.* Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM. – URL: http://method.hydromet.ru/publ/books/80_years/velt_zh.pdf (17.03.2013).
3. *Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д.* Эксперименты по численному моделированию интенсивной конвекции. // Метеорология и гидрология, 2008, № 9, с. 30–44.
4. *Калинин Н.А., Кислов А.В., Бабина Е.Д., Ветров А.Л.* Оценка качества воспроизведения моделью MM5 температуры воздуха в июле на Урале. // Метеорология и гидрология, 2010, № 10, с. 15–22.
5. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидродинамических и гелиогеографических прогнозов. РД 52.27.284-91. – Л.: Гидрометеоздат, 1991. – 149 с.
6. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. Руководящий документ РД 52.27.724-2009. – Обнинск: «ИГ-СОЦИН», 2009. – 13 с.