

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-4-6-27>

УДК 551.509.329

**Экспериментальная технология
численного сверхкраткосрочного прогноза погоды
на основе негидростатической мезомасштабной
метеорологической модели с усвоением
радиолокационной информации и данных наземной
наблюдательной сети**

***В.Д. Жупанов, В.И. Лукьянов, Е.В. Васильев, Т.Г. Дмитриева,
А.В. Смирнов, А.Б. Скомсков***

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
vizhu@mecom.ru*

Дано краткое описание технологии численного сверхкраткосрочного прогноза погоды на основе негидростатической модели общего пользования WRF-ARW. Изложены результаты оценки краткосрочного и сверхкраткосрочного прогноза температуры, ветра и осадков различной интенсивности, полученные по расчетам этой модели при интегрировании на вложенной сетке с шагом 3 км, прямым моделированием глубокой конвекции и усвоением радиолокационной информации и данных наземной наблюдательной сети. Прогнозы оценивались над центральной частью Европейской территории России по стационарным и радиолокационным измерениям летом 2020 г. Показано, что модель адекватно воспроизводит мезомасштабные конвективные системы и связанные с ними области сильных осадков, ветра и гроз. Обсуждаются возможные причины систематических погрешностей прогнозов и способы уменьшения величины пространственных и временных ошибок.

Ключевые слова: численный сверхкраткосрочный прогноз, мезомасштабная метеорологическая модель, усвоение радиолокационной информации, осадки, опасные явления, активная конвекция

**Experimental technology
for very-short-range numerical weather
prediction based on a nonhydrostatic
mesoscale meteorological model with assimilation
of radar and ground-based observational data**

***V.D. Zhupanov, V.I. Luk'yanov, E.V. Vasil'ev, T.G. Dmitrieva,
A.V. Smirnov, A.B. Skomskov***

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,
Moscow, Russia
vizhu@mecom.ru*

A brief description of the very-short-range numerical weather prediction technology based on the WRF-ARW nonhydrostatic model is presented. Skill scores are provided for the short- and very-short-range forecasts of temperature, precipitation and wind of various intensity, which were calculated with this model as a result of its integration on the nested grid with a spacing of 3 km, with the direct simulation of deep convection and the assimilation of radar and ground-based weather station data. The forecasts for a location were verified for the central part of European Russia using radar and weather station data for the summer of 2020. It is demonstrated that the model adequately simulates mesoscale convective systems and the related zones of heavy precipitation, strong winds, and thunderstorms. Possible reasons for forecast biases and the ways to reduce the value of spatial and temporal errors are discussed.

Keywords: numerical very-short-range forecasting, mesoscale meteorological model, radar data assimilation, precipitation, severe weather events, active convection

Введение

Существенный прогресс отечественной метеорологии в области радиолокационных наблюдений и ввод в эксплуатацию системы доплеровских метеорологических локаторов ДМРЛ-С способствуют развитию работ в области мезомасштабного моделирования и повышению на этой основе качества численных сверхкраткосрочных прогнозов погоды (заблаговременность до 12 ч).

Первые численные эксперименты по адаптации мезомасштабных метеорологических моделей MM5, COSMO и WRF для использования в прогностической практике Росгидромета были выполнены под научным руководством Н.Ф. Вельтищева в 2005–2007 гг. [2, 3, 8]. Дальнейшее развитие исследований по численному прогнозу опасных явлений погоды (интенсивных осадков, сильного ветра) велось как на основе модели COSMO разных модификаций, так и на основе модели WRF-ARW (Open Source пакет v.3), как наиболее приспособленной версии для решения этих задач [4, 5, 6, 18].

Следующим этапом данных исследований явилось создание на основе негидростатической модели высокого пространственного разрешения WRF-ARW (далее – модель) с 3dvar-усвоением текущей информации сети ДМРЛ-С и наземной наблюдательной сети технологии гидродинамического сверхкраткосрочного прогноза опасных явлений погоды применительно к территории Центрального федерального округа [6]. Исследования проводились в рамках работ по созданию технологии валидации радиолокационной метеорологической информации. Представленная в данной работе технология сверхкраткосрочного прогноза является российским аналогом системы HRRR (High Resolution Rapid Refresh) с пространственным разрешением 3 км и ежечасным усвоением радиолокационной информации, разработанной на основе модели WRF-ARW для сверхкраткосрочного прогноза элементов погоды по территории США с заблаговременностью 18 ч и оперативно эксплуатируемой в NCEP (NOAA, США) [14].

В данной статье представлены результаты работ по созданию и опытной эксплуатации экспериментальной технологии численного сверхкраткосрочного прогноза погоды для центральной части Европейской территории России.

**Технология численного сверхкраткосрочного прогноза
элементов погоды, зон активной конвекции и связанных с ними
опасных явлений погоды для центральной части
Европейской территории России**

Основой любой технологии гидродинамического мезомасштабного прогноза погоды является прямое информационное взаимодействие в режиме реального времени различных по своей природе и функциональному назначению вполне самостоятельных компонент численного моделирования и процедур обработки текущей оперативной информации:

- средств подготовки прогностической информации, используемой в качестве начальных данных;
- системы усвоения текущих данных гидрометеорологических наблюдений;
- численной негидростатической мезомасштабной модели;
- постпроцессинга прогностических полей численной модели;
- мультипроцессорной вычислительной среды с мультипользовательской файловой системой, обеспечивающей подготовку необходимой прогностической продукции с требуемым пространственно-временным разрешением.

Рассматриваемая в настоящей работе технология включает следующие основные блоки:

- программную среду численного краткосрочного прогноза и формирования базы ежечасных прогностических полей с горизонтальным пространственным разрешением 9, 3 и 1 км различной заблаговременности от 12 до 72 часов на основе негидростатической модели WRF-ARW с использованием вложенных сеток двухстороннего взаимодействия, прямого расчета конвекции и усвоения текущих метеорологических, аэрологических и радиолокационных данных наблюдений;
- программную среду формирования и ведения региональной базы данных доплеровских радиолокационных комплексов ДМРЛ-С на основе информации, передаваемой в коде BUFR и формате ГИМЕТ-2010 с горизонтальным пространственным разрешением 4 и 1 км соответственно;
- реализованную на базе пакета WRFDA 3dvar систему ежечасного усвоения информации об отражаемости и радиальной скорости ветра по данным 15 ДМРЛ, расположенных в области моделирования с использованием в качестве первого приближения ежечасных прогностических полей с горизонтальным пространственным разрешением 3 км;
- реализованную на базе пакета GrADS программную оболочку формирования метеограмм и карт погоды на основе прогностических полей

с горизонтальным пространственным разрешением 3 км и временным разрешением 1 час.

В качестве информационно-вычислительной среды используется часть ресурса нового суперкомпьютера Росгидромета.

Основа рассматриваемой технологии – модель WRF-ARW – базируется на негидростатических «упругих» уравнениях, записанных в орографических координатах. Модель способна воспроизводить атмосферные циркуляции, в которых велика роль вертикальных ускорений (конвективные движения, орографические циркуляции, атмосферные фронты). Подобно другим прогностическим моделям, в ней можно выделить динамическое ядро и блоки параметризаций. Динамическое ядро предназначено для моделирования процессов переноса и согласования полей давления и скорости. Блоки параметризаций дают приближенное представление различных физических процессов подсеточного масштаба. Подробное описание модели приведено в [3, 18, 19].

Выбор пространственного разрешения вычислительной сетки основан на компромиссе между желательным (1 км) и предельно допустимым при воспроизведении конвекции разрешением (9 км). Вложения производятся только в горизонтальной плоскости, поэтому по вертикали область расчетов остается одинаковой на всех сетках. Вложенные сетки ориентированы так же, как и материнская, но шаг дочерних сеток в целом число раз меньше шага родительской. Шаг по времени в схеме Рунге – Кутты третьего порядка и «акустический» шаг по времени ограничиваются соответствующим числом Куранта. Сетки с разрешением 3 и 1 км являются рабочими, в то время как сетка 9 км является вспомогательной и позволяет лучше адаптировать начальные поля модели, полученные из модели GFS (NCEP) с разрешением 0,25°. В данной работе основное внимание уделено результатам прогностических расчетов на сетке с разрешением 3 км. Авторами ведутся работы по верификации прогностических полей, расчет которых выполняется на вложенной сетке с горизонтальным пространственным разрешением 1 км (аналогично с усвоением данных сети ДМРЛ и наземной наблюдательной сети). Оценки качества локальных прогнозов на сетке 1 км планируется представить в следующих публикациях.

Для представления в модели микрофизических процессов используется параметризация WRF Double-Moment 6-class (<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/pub-doc.html>), в которой учитываются как водность облаков и жидких осадков, так и ледность облаков, снега и крупы (града). При расчетах на вложенных сетках параметризация конвекции не производится – она моделируется непосредственно. Для параметризации процессов в пограничном слое используется схема Меллора – Ямады – Янича, вертикальная турбулентность в которой рассчитывается с использованием уравнения турбулентных пульсаций энергии. Расчет коротковолновой и длинноволновой радиации

производится по схеме RRTMG – новая версия схемы RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) с использованием стохастической модели учета влияния облачности. Для параметризации процессов на поверхности Земли и в почве используется схема NOAH, как наиболее универсальная из всех параметризаций этого типа.

Начальные условия в модели берутся из прогнозов материнской модели GFS. Для подготовки начальных условий используется информация о геопотенциале, температуре и влажности воздуха, горизонтальных компонентах скорости ветра, температуре подстилающей поверхности, приземном давлении, температуре почвы, водном эквиваленте снежного покрова, альбедо подстилающей поверхности, доле растительного покрова, рельефе, а также маска вода – суша. Вертикальная скорость и все переменные, характеризующие гидрометеоры, в начальный момент равны нулю. При подготовке начальных условий выполняется коррекция полей первого приближения путем усвоения данных контактных измерений и радиолокационной информации (отражаемости и радиальной скорости). Для этого используются процедуры многоэлементного объективного анализа и трехмерного вариационного усвоения данных.

Выходная прогностическая продукция рассматриваемой в настоящей работе технологии готовится на основании прогностических переменных, генерируемых на каждом шаге по времени. Важнейшим элементом технологии является прогноз зон активной конвекции и неблагоприятных и опасных явлений погоды (сильных осадков, гроз, града, шквалов), в состав выходной продукции входят карты опасных явлений (meteoalarm), которые строятся на основе ежечасных прогностических полей модели WRF-ARW. Полученные экспериментальным путем пороговые значения модельных переменных, идентифицирующих мезомасштабные конвективные комплексы в целом и отдельные явления в частности, представлены в следующих разделах статьи. С заданной периодичностью (1 ч) диагностируется около 200 полей (трехмерных и двумерных), которые можно использовать как в научно-исследовательских, так и прогностических целях. В состав выходной продукции кроме обычно используемых переменных включаются такие переменные, как вертикальная скорость, водность гидрометеоров и рассчитываемая по их значениям величина радиоэха. Несколько полезных переменных рассчитывается в столбе атмосферы до высоты 100 гПа: конвективная доступная потенциальная энергия (CAPE), водозапас и ледозапас облаков и осадков, влагозапас атмосферы. На поверхности суши даются прогнозы температуры и влажности почвы, водного эквивалента снега.

Исходным документом, содержащим выходную прогностическую продукцию модели WRF-ARW, является сводка GRIB1. Информация выдается на изобарических поверхностях 975, 950, 925, 850, 700, 500, 300, 200, 100 гПа. Часть переменных, например ледность крупы, града и снега, дается на модельных уровнях.

В настоящей работе проведена оценка качества воспроизведения основных метеозлементов (температуры воздуха, скорости ветра, осадков) версией модели WRF-ARW с шагом сетки 3 км. Качество моделирования оценивалось путем сравнения модельных данных с данными наземной наблюдательной сети, а именно – с данными 176 метеорологических станций, расположенных на территории, покрываемой расчетной областью модели.

Данные наблюдений метеостанций сравнивались с прогностическими значениями в узле модельной сетке, ближайшем к метеостанции.

Оценка качества прогнозов на мелких сетках представляет определенную трудность, так как отсутствует проверочный материал с соизмеримым пространственно-временным разрешением. Для рассчитанных осадков наилучшим проверочным материалом служат данные их станционных измерений. При использовании прогностической информации рассматриваемой модели, так же как и любой другой мезомасштабной модели, следует исходить из того, что точный детерминированный прогноз положения сравнительно небольших объектов с экстремальными значениями переменных практически невозможен. Появление такого объекта в прогностическом поле может лишь указывать на то, что в некоторой его окрестности с достаточно большой вероятностью можно ожидать экстремальные значения полей данной метеорологической переменной.

Ввиду вышесказанного для оценки качества прогноза осадков в качестве эксперимента авторами были рассчитаны «площадные» оценки: рассматривались не значения в ближайшем узле модельной сетки, а средние и максимальные значения по квадратам различного размера в окрестности станции. Результаты показали, что в целом для модели с таким достаточно высоким пространственным разрешением (3 км) использование «площадного» подхода не дает выигрыша в оценках качества прогноза. В связи с этим не только для непрерывных переменных (температура воздуха, ветер), но и для осадков станционные данные сравнивались с данными в ближайшем узле модельной сетки. Однако необходимо отметить, что при анализе отдельных случаев выпадения сильных и очень сильных осадков конвективного характера рекомендуется, как указано выше, рассматривать модельные данные в некоторой окрестности (порядка 20–30 км) метеостанции.

При оценке качества моделирования метеорологических параметров использовались только те данные, для которых имелись полноценные пары данных «наблюдение – прогноз». В случае отсутствия хотя бы одного компонента из указанной пары (это может быть вызвано как отсутствием модельного расчета, так и (чаще) отсутствием или ошибками в данных измерений) случаи исключались из оценки. Для формирования сводных оценок, представленных ниже в таблицах, использовались наиболее полные с точки зрения количества полученных полноценных пар «наблюдение – прогноз» сроки старта модельных расчетов и заблаговременности прогноза.

В качестве критериев качества использовались показатели, рекомендованные методическими документами ВМО (например, Рекомендациями по верификации и взаимному сравнению количественных прогнозов осадков оперативных численных моделей прогноза погоды [17]) и Росгидромета [13].

В рамках настоящей работы представлены оценки не только для сверхкраткосрочного, но и для краткосрочного прогноза погоды по модели WRF-ARW с шагом сетки 3 км, поскольку сверхкраткосрочный прогноз, не основанный на фоновом прогнозе большей заблаговременности, является некорректным с методической точки зрения.

Результаты численных экспериментов

Опытная эксплуатация экспериментальной технологии численного сверхкраткосрочного прогноза погоды ведется на новом суперкомпьютере Росгидромета. Конфигурация расчетных сеток моделей с разрешением 9, 3 и 1 км приведена на рис. 1. Прогностические расчеты по моделям с шагом сетки 9 и 3 км ведутся в масштабе реального времени за сроки 00, 03, 06, 09, 12, 18, 21 ч ВСВ и 03, 09, 15, 21 ч ВСВ соответственно. Расчеты по модели с разрешением 1 км ведутся в экспериментальном режиме в летний период года – с мая по сентябрь.

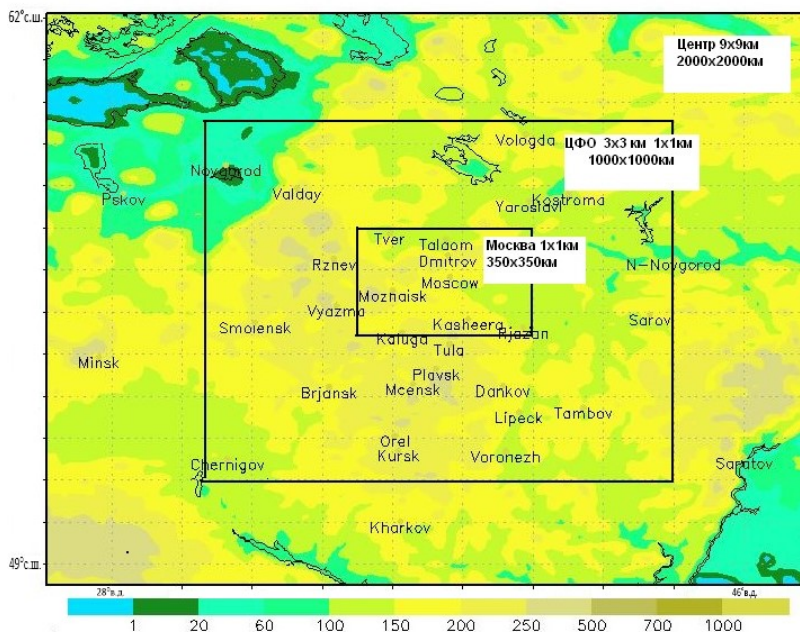


Рис. 1. Конфигурация расчетных сеток модели WRF-ARW с шагом 9, 3 и 1 км. Цветом представлена высота над уровнем моря (м).

Fig. 1. The configuration of WRF-ARW model grids with a spacing of 9, 3, and 1 km. The colors represent the altitude above sea level (m).

Размер области прогноза составил 1000×1000 км. Для сравнительной оценки, как указывалось выше, использованы данные 176 метеостанций, расположенных на данной территории. Заблаговременность прогноза – 72 ч. Оценивались ежедневные прогнозы, рассчитанные в период с 25 июня по 15 сентября 2020 года.

В состав оценочной базы входили ежечасные прогностические поля температуры воздуха, максимальных порывов ветра, сумм осадков, явлений погоды, полученные с помощью рассматриваемой версии модели с шагом сетки 3 км, данные ДМРЛ (радиолокационная отражаемость) и ежедневные макеты данных метеорологических станций.

Прогноз температуры воздуха. Для оценки качества модельного прогноза температуры воздуха были рассчитаны традиционно используемые для этой цели показатели, а именно:

- систематическая ошибка (BIAS);
- средняя абсолютная ошибка (MAE);
- среднеквадратическая ошибка (RMSE).

В табл. 1 представлены вышеперечисленные критерии качества для прогнозов температуры воздуха различной заблаговременности по модели WRF-ARW с шагом сетки 3 км.

Таблица 1. Оценки качества прогнозов температуры воздуха по модели WRF-ARW с шагом сетки 3 км

Table 1. Skill scores of 3 km WRF-ARW air temperature forecasts

Заблаговременность прогноза, ч	Количество случаев	BIAS	MAE	RMSE
12	41656	-1,55	2,58	3,55
24	41274	-1,28	2,45	3,32
36	40133	-0,61	2,19	2,94
48	39806	-0,33	1,93	2,57
60	34694	0,47	1,87	2,46
72	34293	0,44	1,91	2,49

Видно, что в первые 48 часов модель преимущественно занижает температуру воздуха, а после этого – несколько ее завышает. Средняя абсолютная ошибка прогноза температуры в среднем составляет около 2 °С, что связано с особенностью задания начальных условий на вложенной сетке и другими особенностями локальной модели. В связи с этим с методической точки зрения для оперативного синоптика видится целесообразным использование прогнозов температуры воздуха из моделей с более грубым разрешением: например, авторские эксперименты с моделью с шагом сетки 9 км показали, что абсолютная ошибка по температуре меньше, чем для модели с более высоким разрешением (в пределах 1,5 °С).

Прогноз порывов ветра. Использование 3dvar-усвоения информации ДМРЛ-С и применение в модели с вложенными сетками двухстороннего влияния прогрессивных параметризаций микрофизических процессов заметно повысило качество прогнозов порывов ветра в широком диапазоне их скорости (табл. 2) по сравнению с результатами ранее выполненных численных экспериментов по численному моделированию интенсивной конвекции [5].

Таблица 2. Оценки качества прогнозов порывов ветра по модели WRF-ARW с шагом сетки 3 км

Table 2. Skill scores of 3 km WRF-ARW wind gusts forecasts

Заблаговременность прогноза, ч	Количество случаев	BIAS	MAE	RMSE
12	665	-1,23	3,97	4,94
24	500	-0,36	3,97	4,71
36	580	-1,67	3,32	4,19
48	465	-1,89	4,02	5,20
60	511	-1,32	3,65	4,42
72	426	-1,73	4,18	5,07

Что касается различных градаций, анализ отдельных случаев сильного ветра (например, 3, 7, 14, 27 июля, 10 и 26 августа в различных районах Москвы и Московской области) показывает, что если слабый и умеренный ветер достаточно удовлетворительно прогнозируется и версией модели с более грубым разрешением (9 км), то успешное прогнозирование порывов ветра более 15 м/с возможно лишь при использовании мезомасштабной модели с пространственным разрешением не менее 3 км и 3dvar-усвоением радиолокационной информации (отражаемости и радиальной скорости) комплексов ДМРЛ-С.

Прогноз осадков. Качество прогноза 12-часовых сумм осадков, рассчитываемых на основе мезомасштабной модели высокого пространственного разрешения, оценивается для выбранного пункта путем сравнения прогностических значений с данными инструментальных измерений. Многообразие факторов, влияющих на формирование полей осадков, обуславливает большое их разнообразие. Поля короткопериодных конвективных осадков имеют, как правило, полосовую структуру и отличаются большой изменчивостью.

В табл. 3 представлена статистика ошибок прогноза осадков различной заблаговременности для модели с пространственным разрешением 3 км, аналогичная представленной выше для температуры воздуха и ветра. Из таблицы видно, что количество осадков в целом несколько занижается моделью, а абсолютная ошибка составляет порядка 1–1,5 мм/12ч.

Таблица 3. Ошибки прогноза 12-часовых сумм осадков различной заблаговременности, рассчитанных по мезомасштабной модели с пространственным разрешением 3 км

Table 3. The errors of 12 h total precipitation forecasts with different lead times calculated using the mesoscale model with a spatial resolution of 3 km

Заблаговременность прогноза, ч	Количество случаев	BIAS	MAE	RMSE
18	25314	0,082	1,582	4,80
30	24800	-0,198	1,389	4,28
42	24474	-0,398	1,3	4,04
54	22920	-0,361	1,262	3,85
66	21028	-0,365	1,244	3,99
18	25314	0,082	1,582	4,80

Дополнительно к указанным выше оценкам прогнозов 12-часовых сумм осадков приведем значения некоторых показателей, используемых при оценке качества прогностических моделей [1, 13].

Матрица сопряженности:

N11 N12 N10

N21 N22 N20

N01 N02 N00 ,

где N11 – число случаев, когда явление прогнозировалось и наблюдалось;

N12 – число случаев, когда явление прогнозировалось, но не наблюдалось (ложные тревоги);

N10 = N11 + N12 – число случаев, когда прогнозировалось явление;

N21 – число случаев, когда прогнозировалось отсутствие явления, но оно наблюдалось (пропуск цели);

N22 – число случаев, когда прогнозировалось отсутствие явления и оно не наблюдалось;

N20 = N21 + N22 – число случаев с прогнозом отсутствия явления;

N01 = N11 + N21 – число случаев с явлением;

N02 = N12 + N22 – число случаев с отсутствием явления;

N00 – общее число случаев;

POD = N11/N01 – предупрежденность явления;

FAR = N12/N10 – коэффициент ложных тревог.

В табл. 4 представлены оценки прогноза 12-часовых сумм осадков за рассматриваемый период по градациям. Оценки были получены для различных заблаговременностей, однако в связи с тем, что значения основных показателей качества моделирования осадков не столь существенно изменяются в зависимости от заблаговременности, во избежание загромождения таблицы однотипными данными в ней представлены только значения показателей для прогнозов с заблаговременностью 18 и 30 ч.

Таблица 4. Пороговые оценки прогноза 12-часовых сумм жидких осадков с заблаговременностью 18 и 30 ч, рассчитанных по мезомасштабной модели с пространственным разрешением 3 км

Table 4. Threshold skill scores of 12 h total precipitation forecasts with a lead time of 18 and 30 hours calculated using the mesoscale model with a spatial resolution of 3 km

Количество осадков, мм/12ч	Заблаговременность, ч	N11	N12	N21	N22	POD	FAR
>0	18	5639	5663	2207	11805	0,72	0,50
≥0,3		3699	3654	2956	15005	0,56	0,50
≥3		1371	1962	2268	19713	0,38	0,59
≥15		92	366	399	24457	0,19	0,80
≥30		11	85	86	25132	0,11	0,89
>0	30	4979	3930	2822	13069	0,64	0,44
≥0,3		3248	2448	3373	15731	0,49	0,43
≥3		1194	1307	2467	19832	0,33	0,52
≥15		64	299	390	24047	0,14	0,82
≥30		3	67	77	24653	0,04	0,96

В системе Росгидромета принято оценивать качество прогноза жидких осадков для определенных градаций их 12-часовых сумм: слабые осадки (0,0–0,2 мм), небольшие осадки (0,3–2 мм), умеренные осадки (3–14 мм), сильные осадки (15–49 мм), очень сильные осадки (≥ 50 мм) [12, 13]. В настоящем исследовании использовался общепринятый в мировой практике подход, основанный на пороговых значениях сумм осадков [17]. В качестве пороговых значений количества осадков взяты пределы указанных выше градаций осадков, лишь последняя градация (очень сильные осадки) объединена с градацией сильных осадков в целях получения более статистически значимых результатов: в связи с незначительностью количества случаев сумм осадков ≥ 50 мм/12ч взят более низкий порог, равный 30 мм/12ч.

Из данных, представленных в таблице, следует, что модель удовлетворительно прогнозирует факт осадков (>0 мм), слабые и небольшие осадки, однако для умеренных и сильных осадков наблюдается большое количество ложных тревог, т. е. их модельное количество в большинстве случаев превышает фактическое. Данная тенденция присуща многим современным моделям.

Прогноз активной конвекции и связанных с ней неблагоприятных и опасных явлений погоды

Основным источником сведений об облачности и связанных с ней опасных явлениях погоды являются радиолокационные комплексы. Информация ДМРЛ-С, обновляемая каждые 10 минут, включает данные в виде объемных файлов с пространственным разрешением 1 км и данные

в коде BUFR с пространственным разрешением 4 км. Измеряемыми (первичными) являются значения горизонтальной радиолокационной отражаемости и радиальной скорости. К числу производных (вторичных) продуктов относятся сведения об интенсивности осадков, характеристиках облачности и метеорологических явлений – гроз, града, шквалов и смерчей.

При усвоении радиолокационной информации в мезомасштабной модели в основном используются сведения об интенсивности осадков, горизонтальной отражаемости и радиальной скорости, причем предпочтительным является совместное усвоение данных о радиолокационной отражаемости и радиальной скорости, которое оказывает заметное воздействие на прогноз как динамических, так и термодинамических переменных.

Представляют интерес результаты сравнительного анализа прогностических полей, рассчитанных по модели высокого пространственного разрешения, и фактических полей радиолокационных данных. Остановимся на сравнении полей ежечасных сумм осадков и максимума радиолокационной отражаемости.

Значение радиолокационной отражаемости в модели, следуя [15], определяется как сумма отражаемости трех гидрометеоров (дождь, снег и лед), каждая из которых является функцией плотности, температуры, водности жидких и твердых осадков.

Сравнительные оценки ежечасных значений максимальной радиолокационной отражаемости ДМРЛ-С «Внуково» и «Профсоюзная» выполнены за те же даты, что и сравнение ежечасных прогностических полей осадков и максимальной радиолокационной отражаемости модели с данными ДМРЛ-С «Внуково». Район Волоколамска (55,5–56,41° с. ш., 35,011–36,051° в. д.) выбран по условию относительно равной удаленности от мест установки измерительных комплексов и минимума постоянных помех.

Приведенные в табл. 5 и 6 сравнительные оценки максимальной радиолокационной отражаемости показывают, что отличия рассчитанных по модели прогностических значений вполне сопоставимы с различием измерений соседних комплексов ДМРЛ-С.

Указанное обстоятельство является важным, так как позволяет использовать для прогноза гроз и шквалов методическую базу радиолокационной метеорологии [9]. Примером такого подхода могут служить карты опасных явлений (meteoalarm). Состав и цветовая палитра прогностических карт опасных явлений погоды эквивалентны аналогичной продукции ДМРЛ-С [7]. На прогностической модельной карте активной конвекции выделяются:

– **зоны гроз** при значениях прогнозируемой максимальной радиолокационной отражаемости более 50 dBz в слое от Земли до изобарической поверхности 500 гПа, выделяются оранжевым цветом;

Таблица 5. Сравнительная оценка ежечасных прогностических полей осадков и максимальной радиолокационной отражаемости модели WRF-ARW с шагом сетки 3 км с данными ДМРЛ-С «Внуково»

Table 5. The comparative assessment of the 3 km WRF-ARW hourly forecasts of precipitation and maximum reflectivity with Vnukovo weather radar data

Вид прогноза	Ошибка	Заблаговременность, ч											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Прогноз ежечасных сумм осадков с разрешением 3 км, мм/ч	BIAS	-0,22	-0,11	0,02	0,02	0,15	0,23	0,34	0,38	0,37	0,35	0,22	0,20
	RMSE	0,80	1,02	1,38	1,58	1,98	2,18	2,32	2,50	2,57	2,78	2,66	2,40
	MAE	0,18	0,25	0,39	0,47	0,53	0,60	0,70	0,79	0,85	0,90	0,87	0,73
Ежечасный прогноз максимальной радиолокационной отражаемости с разрешением 3 км, dBz	BIAS	-0,32	0,03	2,32	3,78	3,48	4,11	2,88	2,80	1,64	1,94	2,13	2,79
	RMSE	10,8	9,8	13,0	12,2	14,3	14,5	12,4	17,5	13,5	17,2	16,0	14,9
	MAE	4,18	4,30	7,22	6,05	7,35	8,22	7,30	10,21	8,41	9,99	9,56	9,40

Таблица 6. Сравнительная оценка ежечасных значений максимальной радиолокационной отражаемости (dBz) комплексов ДМРЛ-С «Внуково» и «Профсоюзная» для территории Волоколамского района Московской области

Table 6. The comparative assessment of hourly values of maximum reflectivity (dBZ) based on Vnukovo and Profsoyuznaya weather radar data for the territory of the Volokolamsk district (the Moscow region)

Ошибка	Заблаговременность, ч											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BIAS	1,6	1,5	1,4	1,6	1,7	1,6	1,4	1,8	1,9	2,4	3,5	3,7
RMSE	8,2	11,8	8,8	12,0	11,6	11,5	13,7	9,2	14,8	12,2	15,7	16,1
MAE	4,2	6,0	4,5	6,6	6,2	6,5	7,7	4,9	9,5	8,6	10,4	10,9

– *зоны слоистообразной и кучевой облачности* по значению максимальной радиолокационной отражаемости в слое от Земли до изобарической поверхности 500 гПа (10 и 20 dBz соответственно), выделяются серым и желтым цветом;

– *зоны слабых, умеренных и сильных осадков* на основе прогностических значений интенсивности обложных осадков за 1 ч (0,03–0,25; 0,25–1; >1 мм/ч соответственно), выделяются тремя градациями зеленого цвета;

– *зоны слабых, умеренных и сильных ливней* по прогностическим значениям сумм осадков продолжительностью 1 ч (1,8–5,6; 5,6–15,4; ≥15,5 мм/ч, при высоте верхней границы облачности >4 км), выделяются тремя градациями синего цвета;

– **зоны шквалов** выделяются красным цветом при рассчитанных значениях приземного ветра более 20 м/с [11]. При этом максимальная скорость приземного ветра в зонах активной конвекции S при модуле вертикальной скорости на изобарической поверхности 500 гПа (W_{500}) более 1 м/с, максимум радиолокационной отражаемости более 50 dBz, относительной влажности воздуха на изобарической поверхности 500 гПа более 60 %, рассчитывается по формуле:

$$S = U_{\max} \cdot (b \cdot |W_{500}| + c), \quad (1)$$

где максимальная скорость ветра U_{\max} рассчитывается по формуле Пескова – Снитковского [10]:

$$U_{\max} = -0,000004V^4 + 0,00088V^3 - 0,0618V^2 + 1,969V, \quad (2)$$

где V – сумма скоростей ветра от поверхности Земли до изобарической поверхности 500 гПа. Значения констант b и c определяются экспериментальным путем: в летний период для центра Европейской территории России $b = 0,1$, $c = 0,3$.

Для использования в наукастинге, в настоящее время определенном ВМО как детальное описание текущих и спрогнозированных на срок от 0 до 6 ч метеорологических параметров, полученных методом экстраполяции в зависимости от характера атмосферных возмущений [16], полезными являются такие параметры, как водность гидрометеоров и рассчитываемые по ее значениям величины: радиоэхо, водозапас и ледозапас облаков и осадков, а также прогностические поля температуры подстилающей поверхности, влажности почвы и высоты снежного покрова.

Анализ отдельных случаев прогноза неблагоприятных и опасных явлений погоды

Пространственно-временные ошибки прогноза опасных конвективных явлений погоды могут быть существенно уменьшены в ходе синоптического анализа прогностических карт, отражающих динамику атмосферы в области активной конвекции. Анализировались результаты численных экспериментов для случаев глубокой конвекции в июле–августе 2020 года:

- сильные осадки (до 39 мм) местами в Московской области 3 июля;
- сильный ветер (до 20 м/с) и сильные, местами очень сильные (51 мм) осадки на большей части Москвы и Московской области 7 июля;
- сильный ветер (до 24 м/с) и сильные, местами очень сильные осадки (до 51 мм) на большей части Московской области, в Калужской и Тульской областях 14 июля;
- сильные осадки (48 мм) и ветер (18 м/с) в Москве (ВДНХ) 27 июля;
- сильные осадки (22 мм) и ветер (14 м/с) во Внуково 26 августа.

На основе анализа результатов численных экспериментов определены пороговые значения модельных переменных, идентифицирующих мезомасштабные конвективные комплексы:

- энергия конвективной неустойчивости (CAPE): $>0,7$ кДж/кг;
- энергия торможения конвекции (CIN): $<0,02$ кДж/кг;
- потоки тепла от поверхности: $>0,3$ кВт/м²;
- относительная влажность воздуха на уровне 500 гПа: >60 %;
- скорость вертикальных движений на уровне 500 гПа: >3 м/с;
- радиолокационная отражаемость на уровне 500 гПа: >20 dBz;
- высота пограничного слоя атмосферы: $>1,5$ км;
- высота верхней границы облачности: >9 км;
- скорость ветра на уровне 700 гПа: >15 м/с;
- SIGMET – значение турбулентности на уровне 500 гПа: 2–3.

Для получения статистически значимых выводов о качестве прогноза опасных конвективных явлений погоды с помощью версий модели WRF-ARW с высоким пространственным разрешением и более надежных пороговых значений параметров конвекции необходимо дальнейшие накопления архива модельных прогнозов за теплый период года.

Рассмотрим более подробно некоторые из указанных выше случаев неблагоприятных и опасных явлений, в том числе конвективных.

14 июля 2020 года Московский регион находился под влиянием обширной двухцентральной депрессии и сформировавшимся в районе Каспийского моря циклоном (давление в центре 997 гПа), наблюдалась неустойчивая погода с грозами, ливнями, порывистым ветром. На большей части территории Москвы и Московской области отмечались порывы ветра до 12–15 м/с, на отдельных станциях на юго-западе, юге, юго-юго-востоке от столицы (Наро-Фоминск, Домодедово, Можайск, Серебряные Пруды, Шереметьево, Внуково, Луховицы) ветер усиливался до 17–21 м/с, в Зарайске – до 24 м/с. Приведенные ниже карта (рис. 2) и метеограмма (рис. 3) прогноза модели WRF-ARW с разрешением 3 км и 3dvar-усвоением информации ДМРЛ-С за 14.07.2020 г. показывают хорошую корреляцию фактических и прогностических порывов ветра, воспроизведенных моделью. На метеограмме для п. Внуково (рис. 3) виден пик максимальных порывов ветра (V_{\max}) во второй половине дня до 18 м/с, по факту наблюдалось 21 м/с. На карте порывов ветра (рис. 2) в районе московского мегаполиса также можно видеть численные значения, равные 18 м/с, по Московской области – до 23 м/с. В целом на прогностической карте зона сильных ветров несколько смещена на запад от фактической, однако порядок значений максимальных порывов согласуется хорошо (18–23 м/с по модельным данным и 17–24 м/с по данным наблюдений).

Что касается осадков для рассматриваемого случая, то их сумма за день (06–18 ч ВСВ) 14.07.2020 г. в Москве составила 8–18 мм/12ч, в Московской области – 11–20 мм/12ч, местами (Можайск, Луховицы) –

27–37 мм/12ч, а на метеостанции Егорьевск – 51 мм/12ч. Также сильные осадки отмечались на территории Калужской и Тульской областей, более чем на 10 станциях наблюдались осадки от 20 до 34 мм/12ч, а в Мосальске и Сухиничах, соответственно, 45 и 51 мм/12ч. На прогностической карте суммарных осадков за 12 ч от счета 21 ч ВСВ 13.07.2020 г. (рис. 2) отчетливо видна зона сильных осадков (≥ 20 мм/12ч, обозначена серым цветом) в циклоне над западной и южной половинами Московской области, над Калужской и Тульской областями. В целом отмечено хорошее согласие фактических и прогностических зон и сумм осадков, на большей территории спрогнозированные осадки одной градации с фактом. Метеограмма модели для Внуково (рис. 3) также подтверждает хорошую корреляцию модельных и фактических суммарных осадков (модель спрогнозировала около 16 мм/12ч, фактическое значение составило 14 мм/12ч) (зеленые столбики). Модель также предсказала грозовую деятельность в дневные и вечерние часы (красные линии в столбиках осадков).

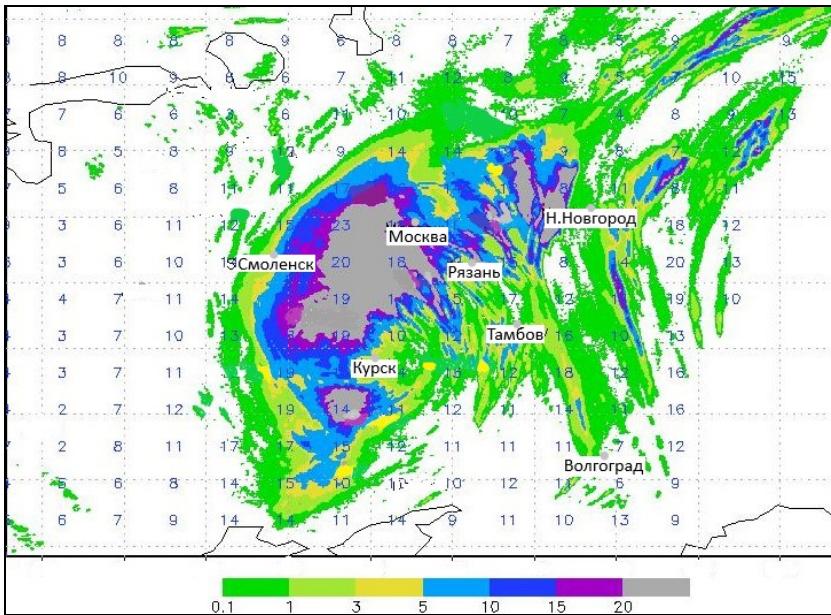


Рис. 2. Карта прогноза суммарных осадков за 12 ч (мм/12ч, цветовая шкала) и максимальных порывов ветра (м/с, численные значения в узлах сетки) за период 06–18 ч ВСВ 14.07.2020 г. по модели WRF-ARW с разрешением 3 км по Европейской территории России от счета 21 ч ВСВ 13.07.2020 г.
Fig. 2. The map of the forecast of 12-hour total precipitation (mm/12 h, color scale) and maximum wind gusts (m/s, numerical values at grid points) for the period of 06:00–18:00 on July 14, 2020 according to the WRF-ARW model with a resolution of 3 km for the European territory of Russia for the model run from 21:00 on July 13, 2020.

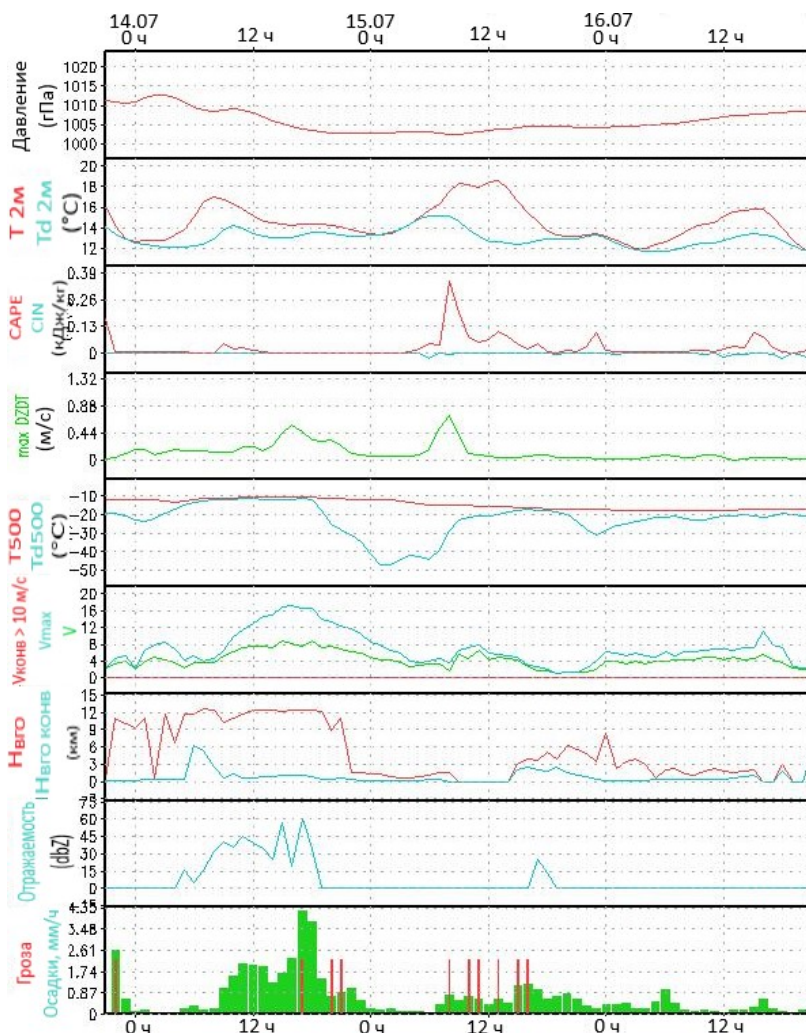


Рис. 3. Метеограмма модели WRF-ARW с разрешением 3 км по пункту Внуково на 14–16.07.2020 г. от счета 21 ч ВСВ 13.07.2020 г.

Fig. 3. The meteogram of WRF-ARW with a grid spacing of 3 km for Vnukovo for July 14–16, 2020 (the model run from 21:00 UTC on July 13, 2020).

Показателен также прогноз модели с разрешением 3 км и 3dvar-усвоением радиолокационной информации от счета 21 ч ВСВ 06.07.2020 г. на период 07–09.07.2020 г. по Московскому региону, где были хорошо спрогнозированы условия для активной конвективной деятельности (фактические порывы ветра 15–21 м/с, ливневые дожди с количеством осадков 3–14 мм/12ч, локально до 17 мм/12ч, грозы, местами град) различной интенсивности в течение трех дней, вызванные прохождением активных фронтальных систем южного циклона (рис. 4).

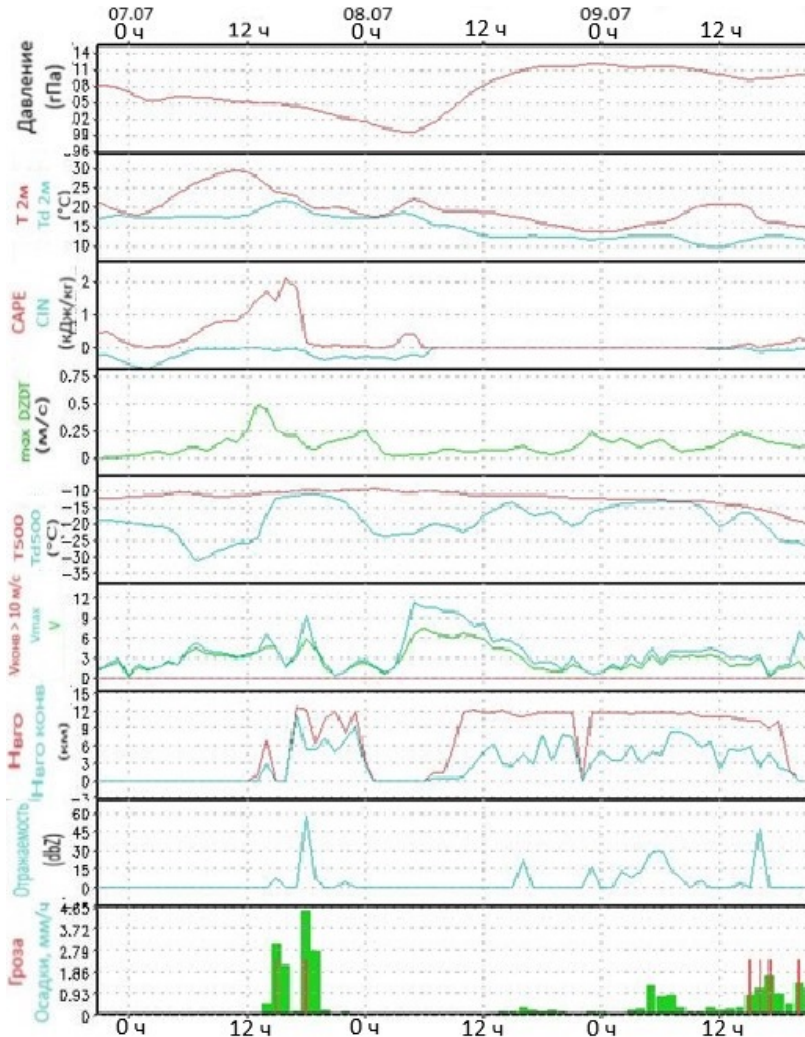


Рис. 4. Метеограмма модели WRF-ARW с разрешением 3 км по пункту Москва (ВДНХ) на 7–9.07.2020 г. от счета 21 ч ВСВ 06.07.2020 г.

Fig. 4. The meteogram of WRF-ARW with a grid spacing of 3 km for Moscow (VDNKh) for July 7-9, 2020 (the model run from 21:00 UTC on July 6, 2020).

Развитию активной конвекции соответствует прогноз энергии неустойчивости (CAPE) более 2 кДж/кг, что подтверждается ее аналогичным фактическим значением по данным радиозонда для Москвы (27713, п. Долгопрудный). На приведенной метеограмме для п. Москва (ВДНХ) моделью правильно воспроизведена активная грозовая деятельность, пики максимальных порывов ветра соответствуют фактическим (10 м/с), дневные осадки составляют порядка 12 мм/12ч (факт – 10 мм/12ч).

Активная конвективная деятельность также хорошо видна на карте опасных конвективных явлений, фрагмент которой для Европейской

территории России представлен на рис. 5. Цветовая палитра соответствует представленной выше в данном разделе.



Рис. 5. Фрагмент карты опасных конвективных явлений погоды по модели WRF-ARW с разрешением 3 км по Европейской территории России на 14 ч ВСВ 26.08.20 г. от счета 21 ч ВСВ 25.08.20 г. Расшифровка цветовой палитры карты представлена в тексте статьи.

Fig. 5. The fragment of the map of severe weather events for the central region of European Russia based on the WRF-ARW with a grid spacing of 3 km for 14:00 on August 26, 2020 (the model run from 00:00 on August 25, 2020). The description of the color palette is provided in the text.

Из проведенного анализа прогнозов случаев сильных осадков, реализовавшихся на активных фронтальных разделах и имеющих внутримассовый характер возникновения, с разрешением 3 км и 3dvar-усвоением информации ДМРЛ-С, можно сделать вывод, что адекватно прогнозируются осадки различной интенсивности, в том числе сильные, в основном фронтального характера, хорошо выраженных в приземных и барических полях, тогда как конвективные осадки внутримассового характера для летнего сезона воспроизводятся моделью менее успешно, со значительным количеством ложных тревог и завышением сумм осадков.

Выводы

В настоящей работе представлена экспериментальная технология численного сверхкраткосрочного прогноза погоды на основе негидростатической модели общего пользования WRF-ARW. Важнейшей особенностью технологии является усвоение информации сети современных метеорологических радиолокаторов ДМРЛ-С и данных наземной наблюдательной сети. Проведены сравнительные оценки ежечасных прогностических полей осадков и максимальной радиолокационной отражаемости модели с данными ДМРЛ-С, а также данных различных ДМРЛ-С.

Сравнение показало, что отличия рассчитанных по модели прогностических значений вполне сопоставимы с различием измерений соседних комплексов ДМРЛ-С, что позволяет использовать для прогноза опасных конвективных явлений методическую базу радиолокационной метеорологии.

Проведена предварительная оценка качества прогнозов по модели WRF-ARW с горизонтальным разрешением 3 км. Результаты предварительной оценки и анализ отдельных случаев опасных и неблагоприятных конвективных явлений показывают, что модель удовлетворительно прогнозирует такие метеорологические элементы, как порывы ветра, факт осадков, а также слабые и небольшие осадки. Для случаев сильных осадков, особенно конвективного происхождения, наблюдается значительное количество ложных тревог и тенденция к завышению сумм осадков, хотя анализ отдельных случаев фронтальных осадков показывает, что они удовлетворительно прогнозируются моделью, в отличие от внутримассовых. В связи с особенностями локальной модели высокого разрешения значения температуры воздуха целесообразно прогнозировать по данным расчетов модели с более грубым пространственным разрешением (в данном случае, с шагом сетки 9 км).

Показано, что модель адекватно воспроизводит мезомасштабные конвективные системы и связанные с ними области сильных осадков, ветра и гроз, а возникающие пространственно-временные ошибки прогноза опасных явлений погоды для пункта могут быть существенно уменьшены в ходе синоптического анализа. На основе анализа результатов численных экспериментов для случаев глубокой конвекции получены пороговые значения ряда модельных переменных. В дальнейшем авторами планируется продолжить работы по усовершенствованию рассматриваемой версии модели и устранению выявленных недостатков. В связи с этим предпринимаются попытки моделирования на сетке с шагом 1 км и ежечасным усвоением данных. Сделан вывод, что модель адекватно воспроизводит мезомасштабные фронтальные волновые процессы, которые являются причиной локального усиления приземного ветра до 20 м/с и более, что отражается на графике параметра CAPE на 2–3 последовательных ежечасных метеограммах.

Предварительные результаты оценки экспериментальной технологии позволяют полагать, что значимые результаты численного сверхкраткосрочного прогноза опасных явлений погоды, основанного на мезомасштабной модели WRF-ARW и 3dvar-усвоении радиолокационной (отражаемость и радиальная скорость) информации ДМРЛ-С и данных наземной наблюдательной сети, могут быть получены при горизонтальном пространственном разрешении модели не более 1–3 км, размере расчетной области не менее 1000×1000 км, прямом расчете конвекции, использовании двухмоментных микрофизических параметризаций в атмосфере и модели NOAH для параметризации процессов в почве и на ее поверхности.

Список литературы

1. Багров А.Н. Сравнительная оценка успешности прогнозов сильных летних осадков с помощью моделей атмосферы различного масштаба // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. Информационный сборник № 41. 2014. С. 3-16.
2. Вельтищев Н.Ф. Информация о моделях общего пользования MM5 и WRF. Препринт. М.: ГВЦ, 2005. 100 с.
3. Вельтищев Н.Ф. Информация о негидростатической модели COSMO(LM). Препринт. М.: ГВЦ, 2007. 110 с.
4. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада лтд, 2010. 2010. С. 84-135.
5. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Эксперименты по численному моделированию интенсивной конвекции // Метеорология и гидрология. 2008. № 9. С. 30-44.
6. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Эксперименты по усвоению радиолокационной информации в модели WRF-ARW // Метеорология и гидрология. 2012. № 3. С. 5-19.
7. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике. Вторая редакция. М., 2017. <http://map.meteorad.ru/static/VMU-DMRL-180503.pdf>.
8. Жупанов В.Д., Вельтищев Н.Ф. Информация о модели общего пользования WRF-NMM. Препринт. М.: ГВЦ, 2007. 158 с.
9. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети. СПб.: Гидрометиздат, 2002. 337 с.
10. Песков Б.Е., Снитковский А.И. К прогнозу сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 1968. № 7. С. 52-57.
11. Радиолокационные метеорологические наблюдения. Т. 1. СПб.: Наука, 2010. 311 с.
12. РД 52.27.724-2019. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. 66 с.
13. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. С. 31-40.
14. Curtis A. et al. Development of WRF-ARW for Rapid-Refresh (RAP) and High-Resolution Rapid Refresh (HRRR) applications: From research to operations and beyond. 2016. https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/WS2016/oral_presentations/2.3.pdf
15. Gao J., Stensrud D.J. Assimilation of reflectivity data in a convective-scale, cycled 3DVAR framework with hydrometeor classification // J. Atm. Sci. 2012. Vol. 69. P. 1054-1065.
16. Guidelines for Nowcasting Techniques // WMO-№ 1198. World Meteorological Organization, 2017. 68 p.
17. Recommendations for the Verification and Intercomparison of QPFs and PQPFs from Operational NWP Models. Revision 2 // WMO-№ 1485. World Meteorological Organization, 2008. 37 p.
18. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D., Duda M.G., Huang X.-Y., Wang W, Powers J.G. A Description of the Advanced Research WRF Version 3 // NCAR Technical Note, NCAR/TN – 475+STR. 2008. http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.
19. User's Guide for the Advanced Research WRF (ARW) modeling system version 3.8. 2016. http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_v3/contents.

References

1. Bagrov A.N. Sravnitel'naya ocenka uspešnosti prognozov sil'nyh letnih osadkov s pomosh'yu modeley atmosfery razlichnogo masshtaba. Rezul'taty ispytaniya novyh i usovershenstvovannyh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov. Informacionnyy sbornik, 2014, no. 41, pp. 3-16. [in Russ.].

2. *Vel'tischev N.F.* Informaciya o modelyah obshego pol'zovaniya MM5 i WRF. Preprint, Moscow, GVC, 2005, 100 p. [in Russ.].
3. *Vel'tischev N.F.* Informaciya o negidrostaticheskoy modeli COSMO(LM). Preprint. Moscow, GVC, 2007, 110 p. [in Russ.].
4. *Vel'tischev N.F., Zhupanov V.D.* Chislennye prognozy pogody po negidrostaticheskim modelyam obshego pol'zovaniya WRF-ARW i WRF-NMM. 80 let Gidrometcentru Rossii. Moscow, Triada LTD publ., 2010, pp. 84-135. [in Russ.].
5. *Vel'tischev N.F., Zhupanov V.D.* Experiments on numerical modeling of intense convection. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2008, vol. 33, no. 9, pp. 560-569. DOI: 10.3103/S1068373908090033.
6. *Vel'tischev N.F., Zhupanov V.D.* Experiments on the radar reflectivity data assimilation in the WRF-ARW model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2012, vol. 37, no. 3, pp. 149-158. DOI: 10.3103/S1068373912030016.
7. Vremennye metodicheskie ukazaniya po ispol'zovaniyu informacii doplerovskogo meteorologicheskogo radiolokatora DMRL-S v sinopticheskoy praktike. Vtoraya redakciya. Moscow, 2017. Available at: <http://map.meteorad.ru/static/VMU-DMRL-180503.pdf>. [in Russ.].
8. *Zhupanov V.D., Vel'tischev N.F.* Informaciya o modeli obshego pol'zovaniya WRF-NMM. Preprint, Moscow, GVC, 2007, 158 p. [in Russ.].
9. Meteorologicheskie avtomatizirovannye radiolokacionnye seti. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat publ., 2002, 337 p. [in Russ.].
10. *Peskov B.E., Sniitkovskiy A.I.* K prognozu sil'nyh shkvalov. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 1968, no. 7, pp. 52-57. [in Russ.].
11. Radiolokacionnye meteorologicheskie nablyudeniya. Vol. 1. Saint Petersburg, Nauka publ., 2010, 311 p. [in Russ.].
12. RD 52.27.724-2019. Nastavlenie po kratkosrochnym prognozam pogody obshego naznacheniya. 66 p. [in Russ.].
13. RD 52.27.284-91. Metodicheskie ukazaniya. Provedenie proizvodstvennyh (operativnyh) ispytaniy novykh i usovershenstvovannykh metodov gidrometeorologicheskikh i geliograficheskikh prognozov. 151 p. [in Russ.].
14. *Curtis A. et al.* Development of WRF-ARW for Rapid-Refresh (RAP) and High-Resolution Rapid Refresh (HRRR) applications: From research to operations and beyond. 2016. Available at: https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/WS2016/oral_presentations/2.3.pdf.
15. *Gao J., Stensrud D.J.* Assimilation of reflectivity data in a convective-scale, cycled 3DVAR framework with hydrometeor classification. *J. Atm. Sci.*, 2012, vol. 69, pp. 1054-1065.
16. Guidelines for Nowcasting Techniques. *WMO-No. 1198*. Geneva, World Meteorological Organization, 2017, 68 p.
17. Recommendations for the Verification and Intercomparison of QPFs and PQPFs from Operational NWP Models. Revision 2. *WMO-No. 1485*. Geneva, World Meteorological Organization, 2008, 37 p.
18. *Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D., Duda M.G., Huang X.-Y., Wang W., Powers J.G.* A Description of the Advanced Research WRF Version 3 // NCAR Technical Note, NCAR/TN – 475+STR, 2008. Available at: http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.
19. User's Guide for the Advanced Research WRF (ARW) modeling system version 3.8. 2016. Available at: http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_v3/contents.

Поступила 31.10.2020; одобрена после рецензирования 04.12.2020;

принята в печать 11.12.2020.

Submitted 31.10.2020; approved after reviewing 04.12.2020;

accepted for publication 11.12.2020.