

УДК 551.509.313

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕЗОМАСШТАБНОГО ЧИСЛЕННОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОГОДЫ WRF-ARW В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ ПУТЕМ АССИМИЛЯЦИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ О ВЕТРЕ И ОТРАЖАЕМОСТИ

П. О. ЗАЙКО<sup>1)</sup>, А. Н. КРАСОВСКИЙ<sup>2)</sup>, С. К. БОРОДКО<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, пр. Независимости, 110, 220114, г. Минск, Беларусь

<sup>2)</sup>Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы БГУ, ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь

Анализируются прогнозы опасных явлений погоды, выполненные с помощью численной мезомасштабной модели WRF с адаптированной системой ассимиляции данных радиолокационной отражаемости и радиальной скорости с сети белорусских доплеровских метеорологических локаторов Белгидромета (2019). Описываются способы контроля качества радиоэха на основе характеристик двойной поляризации локаторов и метод трехмерной вариационной ассимиляции (3D-VAR), применяемый в целях уточнения исходного поля модели WRF. Приводятся результаты анализа ряда смоделированных случаев осадков и сильного ветра для различных типов циркуляции на территории Беларуси с ассимиляцией радиолокационных данных и без нее. Выполнена статистическая и объектно ориентированная оценка этих прогнозов. Результаты комплексного анализа спрогнозированных случаев с ассимиляцией радарной информации демонстрируют уменьшение ошибки прогноза приземного ветра на высоте 10 м от поверхности земли на 1,34 м/с на ранних часах прогноза (+6 ч), а также улучшение прогноза

---

### Образец цитирования:

Зайко ПО, Красовский АН, Бородко СК. Совершенствование мезомасштабного численного прогнозирования погоды WRF-ARW в Республике Беларусь путем ассимиляции радиолокационных данных о ветре и отражаемости. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2020;2:3–13.  
<https://doi.org/10.33581/2521-6740-2020-2-3-13>

### For citation:

Zaiko PA, Krasouski AN, Barodka SK. Improvement of meso-scale numerical weather prediction WRF-ARW in the Republic of Belarus by assimilation of radar wind and reflectivity data. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2020;2:3–13. Russian.  
<https://doi.org/10.33581/2521-6740-2020-2-3-13>

---

### Авторы:

**Полина Олеговна Зайко** – инженер-программист отдела численного моделирования прогнозов.  
**Александр Николаевич Красовский** – кандидат физико-математических наук; научный сотрудник.  
**Сергей Константинович Бородко** – научный сотрудник.

### Authors:

**Palina A. Zaiko**, software engineer at the numerical weather prediction department.  
[polly\\_lo@tut.by](mailto:polly_lo@tut.by)  
**Aliaksandr N. Krasouski**, PhD (physics); researcher.  
[krasovsky@bsu.by](mailto:krasovsky@bsu.by)  
**Siarhei K. Barodka**, researcher.  
[barodka@bsu.by](mailto:barodka@bsu.by)

местоположения, ориентации областей выпадения осадков и облачных структур, сокращение количества ложных тревог. Представлено предварительное заключение о возможности использования результатов прогнозов в системах наукастинга (сверхкраткосрочный прогноз).

**Ключевые слова:** краткосрочный прогноз погоды; WRF-ARW; ассимиляция данных; доплеровский метеорологический локатор; двойная поляризация; оценка; наукастинг.

## IMPROVEMENT OF MESOSCALE NUMERICAL WEATHER PREDICTION WRF-ARW IN THE REPUBLIC OF BELARUS BY ASSIMILATION OF RADAR WIND AND REFLECTIVITY DATA

P. A. ZAIKO<sup>a</sup>, A. N. KRASOUSKI<sup>b</sup>, S. K. BARODKA<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Republican Center of Hydrometeorology, Control of Radioactive Contamination and Environmental Monitoring of the Republic of Belarus, 110 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220114, Belarus

<sup>b</sup>National Research Center for Ozonosphere Monitoring, Belarusian State University, 7 Kurčatava Street, Minsk 220045, Belarus

Corresponding author: P. A. Zaiko (polly\_lo@tut.by)

The forecasts of severe weather events obtained with the WRF numerical mesoscale model with the adapted system for assimilation of reflectivity and radial velocity data from the network of Belarusian Doppler weather radars used in Belhydromet in 2019 are analysed. A description of the system for the echo quality control based on the radar dual-polarisation characteristics and the method for three-dimensional variational assimilation (3D-VAR) used to assimilate data in the WRF model are described. The results of case studies on the simulation of precipitation and strong wind for various circulation types in Belarus with and without radar data assimilation are given. The statistical and object-oriented verification of these forecasts is provided. The results of the comprehensive assessment reveal a decrease in the forecast error for 10-m wind speed for the early forecast hours (+6 h) by 1.34 m/s, as well as a more accurate forecast of the location, orientation of the cloud systems and precipitation zones, and a decrease in the number of false alarms in the version with assimilation. A preliminary conclusion on the possibility of using the forecast results in nowcasting systems is also made.

**Keywords:** short-range weather forecast; WRF-ARW; data assimilation; Doppler weather radar; dual-polarisation; verification; nowcasting.

### Введение

Системы мезомасштабного численного прогноза погоды (ЧПП) позволяют моделировать с достаточно высокой точностью опасные явления конвективного масштаба (ливни, грозы, шквалистое усиление ветра и т. д.), наносящие значительный экономический ущерб сельскому, лесному хозяйству и транспорту Беларуси<sup>1</sup>. Однако подобный прогноз требует детализации из-за малых временных (от нескольких минут) и пространственных (от сотен метров) масштабов конвективных явлений.

Для повышения точности прогнозов опасных явлений погоды в системах численного моделирования применяется ассимиляция данных с высоким временным и пространственным разрешением, способная зафиксировать конвективные явления на территории страны. К таким данным относятся наблюдения доплеровского метеорологического локатора (ДМРЛ).

Сеть радиолокационных метеорологических наблюдений Беларуси представлена станцией МРЛ-5 (Брест) и пятью доплеровскими метеорологическими локаторами двойной поляризации (Минск, Гомель, Витебск, Гродно, Брест), наблюдения на которых производятся с высокой дискретностью по времени (10 мин) и пространству (0,5–1,0 км) в радиусе 250 км на большей части Беларуси. Они дают уникальную информацию о распределении поля радиального ветра, отражаемости гидrometeorов, интенсивности осадков, микрофизической структуре облаков и зонах обледенения на территории страны. Эту информацию можно ассимилировать в моделях ЧПП [2].

Процесс ассимиляции метеорологических данных направлен на построение более точного начального состояния атмосферы за счет включения новых, ранее не используемых наблюдений с последующим учетом ошибок этих наблюдений и ошибок прогноза модели. В результате согласования всех метеоро-

<sup>1</sup>Седьмое национальное сообщение Республики Беларусь в соответствии с обязательствами по Рамочной конвенции ООН об изменении климата [Электронный ресурс]. URL: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/92104765\\_Belarus-NC7-1-AI-BLR\\_NC7.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/92104765_Belarus-NC7-1-AI-BLR_NC7.pdf) (дата обращения: 15.03.2020).

рологических полей формируются новые начальные и граничные условия, которые используются для последующего прогноза [3].

Республика Беларусь не является членом крупных метеорологических консорциумов и центров (Météo-France (Франция), Met Office (Великобритания) и др.), способных моделировать опасные явления погоды с учетом усвоенных радиолокационных метеорологических наблюдений на ее территории. В связи с этим создание систем ассимиляции данных белорусских метеорологических локаторов и последующего регионального прогнозирования опасных явлений погоды для территории Беларуси представляет собой государственную задачу.

В Белгидромете для прогноза опасных явлений погоды был разработан компонент системы усвоения данных наземных (не входящих в международный обмен) аэрологических и радиолокационных наблюдений для адаптированной мезомасштабной численной модели WRF (Weather Research and Forecasting) на базе метода трехмерного вариационного усвоения 3D-VAR.

Цель статьи – представление результатов использования прогнозов количества осадков и ветра в мезомасштабной модели WRF на территории Беларуси, полученных с помощью адаптированной системы ассимиляции горизонтальной отражаемости и радиальной скорости с сети белорусских ДМЛР.

Для этой цели решен ряд задач: создана база данных прогнозов модели WRF для территории Беларуси; разработаны автоматизированные программные комплексы для обработки и контроля наблюдений ДМЛР Минска, Гомеля, Витебска (выполнены тестирование и выбор оптимального метода фильтрации данных, проведена настройка пороговых значений, запрограммированы обработка и конвертация радиолокационных полей на языке программирования *Python* для последующей ассимиляции), а также для ассимиляции радарных данных (расчет ковариационной матрицы ошибок прогноза модели на основе созданной базы прогнозов, необходимой для ассимиляции методом 3D-VAR, настройка конфигурации системы ассимиляции).

Дается краткий обзор применения полученных прогнозов для систем наукастинга на территории Беларуси.

### Материалы и методы исследования

Развитие сети метеорологических локаторов на территории Беларуси началось в середине 1970-х гг. с установки метеорологического локатора в аэропорту Гомеля (МРЛ-2, 1975) (рис. 1). За это время радиолокационная метеорология прошла развитие от первых некогерентных локаторов до современных доплеровских метеорологических локаторов двойной поляризации, фиксирующих мезоциклоны, зоны турбулентности и сдвиг ветра [1].

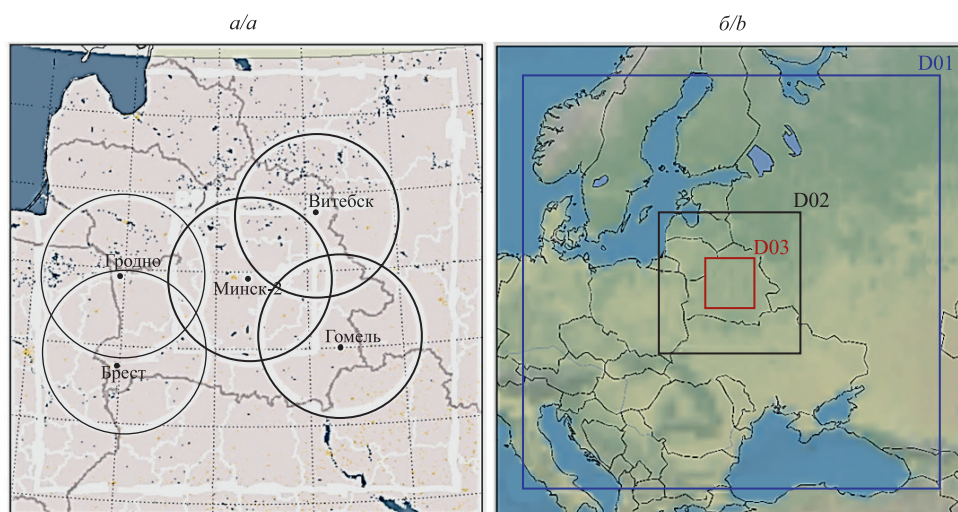


Рис. 1. Карта расположения ДМЛР (а) и области моделирования в эксперименте с шагом сетки 9 км (D01), 3 км (D02), 1 км (D03) (б)

Fig. 1. Map of Doppler weather radars location (a) and modeling domains in experiment with grid size 9 km (D01), 3 km (D02), 1 km (D03) (b)

Сейчас на территории страны расположены шесть метеорологических радиолокационных систем:

- ДМЛР Минска (ДМЛР двойной поляризации с длиной волны 5,3 см на базе ДМЛР «Метеор-500С» (*Gematronic*, Германия));
- ДМЛР Гомеля (ДМЛР двойной поляризации с длиной волны 5,5 см на базе ДМЛР «Метеор-635С»);

• ДМРЛ Витебска (ДМРЛ двойной поляризации с длиной волны 5,3 см и высокой эквивалентной мощностью излучения (900 кВт) на базе системы ДМРЛ-С (ОАО «НПО “Лианозовский электромеханический завод”», Россия));

- ДМРЛ Гродно;
- ДМРЛ Бреста;
- МРЛ-5 (Брест).

Наблюдения на всех доплеровских радиолокационных системах производятся в двух импульсных режимах (отражаемость (радиус 250 км), скорость (радиус 150 км)) на 34 уровнях каждые 10 мин. В 2020 г. введены в эксплуатацию ДМРЛ Бреста и ДМРЛ Гродно (см. рис. 1).

Наиболее перспективными направлениями применения наблюдений белорусских ДМРЛ являются ассимиляция в модели ЧПП, наукастинг, использование поляризационных характеристик для анализа и предупреждения об опасных явлениях погоды (микрошквалы, ливни, турбулентность и др.) для нужд авиации.

### Система контроля качества и подготовки данных ДМРЛ для ассимиляции

В 2014 г. в Белгидромете была разработана адаптированная система мезомасштабного численно-го прогнозирования на основе модели WRF для территории Беларуси с улучшенным представлением геоданных (рельеф) и выбором оптимальных схем параметризации. Модель WRF является совместной разработкой Национального центра атмосферных исследований (National Center for Atmospheric Research, NCAR) и Национального управления океанических и атмосферных явлений (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA).

На первом этапе в соответствии с данной системой был подготовлен базовый компонент ассимиляции метеорологических наблюдений (наземные и аэрологические) для модели WRF [1–3]. На втором этапе велась разработка системы контроля и подготовки белорусских радиолокационных данных и адаптированного компонента системы ассимиляции наблюдений для модели на основе метода 3D-VAR.

Белорусские ДМРЛ являются многопараметрическими (поляризационными), что позволяет проводить более точный анализ помех от неметеорологических объектов и определять микрофизическую структуру метеобъекта (фазовое состояние, форма гидрометеоров), различать снег, ливень, град, а также дождь слабой, средней и сильной интенсивности.

В ходе наблюдений ДМРЛ формируется набор основных выходных параметров, используемых на этапе контроля и непосредственно для ассимиляции: радиолокационная отражаемость горизонтальной поляризации (DBZH); радиальная скорость (VRAD); ширина доплеровского спектра радиальных скоростей (WRAD); коэффициент кросс-корреляции (RHONV); дифференциальная отражаемость (ZDR); дифференциальная фаза (PHIDP); удельный фазовый сдвиг (KDP).

В качестве основных методов удаления помех в радиолокационных данных применялись фильтр Габелла [4] и метод идентификации помех на основе нечеткой логики для поляризационных характеристик (fuzzy echo classification) [5]. Более детально методы рассматриваются в [6]. Стоит отметить, что создание системы контроля позволило отфильтровать помехи и подготовить радиолокационные данные, необходимые при последующей ассимиляции в модель WRF. Авторами проведен ряд экспериментов по оценке эффективности фильтрации не метеорологического эха с ДМРЛ Минска, Гомеля, Витебска выбранными методами и подбору критериев фильтрации. Результаты показали, что применяемый фильтр на основе нечеткой логики покрывает стандартные критерии фильтрации, используемые при анализе эха ДМРЛ (коэффициент кросс-корреляции менее 0,7–0,8 (не метеорологический), дифференциальная отражаемость более 4–5 и др.).

Затем был разработан программный комплекс для автоматизированной конечной подготовки радиолокационных данных, включающий преобразование в координаты системы моделирования WRF, пересчет компонентов скорости ветра и горизонтальной отражаемости на реальные высоты и представление данных в формате, требуемом системой усвоения данных.

### Ассимиляции радиолокационных данных в модель WRF-ARW

В основе адаптированной системы усвоения данных ДМРЛ в Белгидромете лежит трехмерный вариационный метод (3D-VAR), в котором несогласованность между прогнозом и наблюдениями представляется в виде функционала [3; 7]. Нахождение минимумов данного функционала от искомого вектора состояния системы  $X$  позволяет решить задачу

$$J(X) = \frac{1}{2}(X - X^f)^T B^{-1}(X - X^f) + \frac{1}{2}(X^{\text{OBS}} - H(X))^T R^{-1}(X^{\text{OBS}} - H(X)),$$



где  $X$  есть вектор, представляющий искомое поле – состояние атмосферы на сетке в момент анализа;  $X^f$  – поле прогноза по гидродинамической модели атмосферы;  $B$  – матрица ковариаций ошибок прогноза;  $X^{OBS}$  – вектор наблюдений;  $R$  – матрица ковариаций ошибок наблюдений;  $H$  – оператор наблюдений, связывающий наблюдения с истинным состоянием атмосферы. Для минимизации данного функционала применяется метод сопряженных градиентов, который включает оценку изменения контрольных переменных (температура, удельная влажность, давление на уровне земли, завихренность и дивергенция). Количество итераций составило от 15 до 20 для различных случаев.

Отражательная способность, наблюдаемая на локаторе, может быть ассимилирована в численную модель WRF несколькими способами. Первый способ предполагает ассимиляцию горизонтальной отражаемости напрямую через оператор отражательной способности. Второй способ позволяет ассимилировать данные через параметры содержания дождевой воды в облаках, оцениваемые по отражательной способности. Он также включает оценку содержания снега, крупы и других видов влаги в облаке. В настоящем исследовании использовался второй подход для учета влияния наблюдаемого влагозапаса даже при отсутствии дождевой воды на начальном часу расчета [4].

Ассимиляция данных о радиальном ветре производится путем пересчета радиальной скорости с локатора в компоненты скорости ветра модели: радиальный ветер  $v_r$  можно определить, используя компоненты ветра ( $u, v, w$ ), вертикальную скорость движения гидрометеоров (связанную с дождевыми каплями)  $v_t$  и расстояние от радара до точки. Вертикальная скорость  $v_t$  рассчитывается из массового содержания дождевых капель  $q_r$  с коррекцией высоты [3]:

$$v_r = u \frac{x - x^0}{r} + v \frac{y - y^0}{r} + (w - v_t) \frac{z - z^0}{r},$$

$$v_t = 5,40 \left( \frac{p_s}{\bar{p}} \right)^{0,4} (q_r)^{0,125},$$

где  $u, v, w$  – компоненты скорости в декартовых координатах, м/с;  $x, y, z$  – местоположение радара;  $x^0, y^0, z^0$  – положение наблюдения;  $r$  – расстояние между радаром и наблюдением;  $p_s$  – приземное давление;  $q_r$  – массовое содержание дождевой воды, г/кг;  $\bar{p}$  – давление на станции (радаре).

### Вычислительный эксперимент

Для оценки возможности использования разработанной системы ассимиляции данных ДМРЛ, прогноза опасных явлений погоды (осадки, ветер) проводился ряд численных экспериментов (10 случаев), включающих различные синоптические ситуации на территории Беларуси в 2017–2020 гг. Случаи были разделены на три группы соответственно ведущим типам циркуляции, обуславливающим погоду на территории Беларуси: западные и ныряющие циклоны и их фронтальные разделы; южные циклоны; антициклоны (табл. 1) [8]. Для всех смоделированных случаев отмечались неблагоприятные (НЯ) и опасные (ОЯ) явления погоды.

Таблица 1

Описание промоделированных синоптических ситуаций

Table 1

Description of modeling synoptic conditions

| Типы циркуляции             | Количество случаев | Виды неблагоприятных явлений погоды                                                       | Виды опасных явлений погоды                     | Месяц                                |
|-----------------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Западные и ныряющие циклоны | 3                  | Жара (+34°), сильный дождь (15 мм за 12 ч), сильный ливень, сильный ветер (22 м/с), шквал | Очень сильный дождь (57 мм за 12 ч)             | Февраль, март, июль                  |
| Южные циклоны               | 5                  | Грозы, град, сильный дождь, снег, гололедица, шквалы (15–24 м/с), жара (+35°)             | Продолжительный очень сильный дождь (50–130 мм) | Январь (2 случая), август (3 случая) |
| Антициклоны                 | 2                  | Туман, заморозки                                                                          | Отсутствовали                                   | Май, сентябрь                        |

В целях моделирования синоптических условий использовалась система мезомасштабного прогнозирования для территории Беларуси на основе негидростатической модели WRF-ARW версии 4.0 [6; 9].

Прогноз рассчитывался с заблаговременностью +24 ч для трех областей размером 300 × 300 узлов с шагом сетки 9; 3 и 1 км на 40-Ета уровнях. Внешняя область (9 км) покрывала территорию Европы. В качестве начальных и боковых граничных условий использовались прогнозы модели GFS (Global Forecast System). Данные ДМРЛ Минска, ДМРЛ Гомеля и ДМРЛ Витебска (2019) ассимилировались методом 3D-VAR в срок, близкий к исходному сроку прогноза (00; 06; 12; 18 ч UTC), во временном окне ±1 ч. Для учета ошибок прогноза модели WRF была построена ковариационная матрица фоновых ошибок прогноза модели за 10 дней для каждого случая на основе метода NMC (National Meteorological Center) [6; 7].

Для контроля параллельно выполнялось моделирование выбранных случаев с ассимиляцией радиолокационных данных и без нее. Для области моделирования с наибольшим шагом сетки (9 км) учет конвективных процессов проводился через схему параметризации Каина – Фритша, для более крупных областей (3 и 1 км) – напрямую [6; 9].

### Оценка использования прогнозов модели WRF с ассимиляцией радиолокационных данных для прогноза осадков и ветра

Для определения влияния ассимилированных радиолокационных данных на результаты прогноза в промоделированных случаях проводились статистическая и объектно ориентированная оценки прогнозов с ассимиляцией и без нее.

На этапе статистической оценки рассчитывались средние (ME) и абсолютные (MAE) ошибки, средне-квадратическая ошибка (RMSE) и коэффициент корреляции Пирсона  $R$  на каждые 3 ч для температуры, давления, скорости ветра и на 12 ч для осадков в соответствии с рекомендациями (табл. 2) [10]. В качестве контрольных использовались наблюдения 49 наземных метеорологических станций Беларуси и карты опасных явлений погоды по данным метеорологических радиолокационных систем.

Статистическая оценка результатов всех случаев моделирования говорит об определенном положительном влиянии ассимиляции радиолокационных наблюдений в начальные часы прогноза на успешность воспроизведения скорости приземного ветра (высота 10 м) и распределения поля осадков (см. табл. 2).

Таблица 2

Оценка прогноза скорости приземного ветра (м/с) на высоте 10 м по всем случаям (+3, +6 ч)

Table 2

Verification of the wind speed forecasts (m/s) at 10 m for all cases (+3, +6 h)

| Заблаговременность, ч | ME              |                | MAE             |                | RMSE            |                | R               |                |
|-----------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
|                       | без ассимиляции | с ассимиляцией | без ассимиляции | с ассимиляцией | без ассимиляции | с ассимиляцией | без ассимиляции | с ассимиляцией |
| +3                    | 0,98            | 0,84           | 1,73            | 1,44           | 2,25            | 2,14           | 0,84            | 0,86           |
| +6                    | 1,74            | 1,41           | 1,97            | 1,89           | 4,18            | 3,26           | 0,67            | 0,71           |

Ошибка скорости ветра в летний период оказалась меньше, чем в переходные и зимний периоды. В качестве примера летнего и зимнего периодов представлен ход скорости приземного ветра (высота 10 м) на станции Верхнедвинска (24.08.2017) и станции Мозыря (26.01.2019). На всем интервале прогноза до 24 ч в летний период ошибка прогноза скорости ветра с ассимиляцией радиолокационных данных была значительно ниже, чем в варианте без ассимиляции (рис. 2). Для зимнего случая в первых часах ошибка без ассимиляции оказалась меньше, но к ночным срокам обе ошибки сравнялись (рис. 3).

Результаты прогноза количества осадков оценивались двумя способами: с помощью расчета показателей по таблице сопряженности и объектно ориентированным методом MODE (Method for Object-Based Diagnostic Evaluation) [11].

В результате статистической оценки прогнозов метеорологических полей общая оправдываемость прогноза осадков (PC) увеличилась на 1 % для первых 12 ч прогноза для летних периодов. Показатель прогноза наличия явления (POD) с ассимиляцией данных ДМРЛ был выше на 1 %. Улучшился показатель прогноза отсутствия явления (PODN) на 3 %, и сократился показатель ложных тревог (FAR) на 1,5 %. Значение критерия Пирса – Обухова (HK) говорит о достаточно высокой способности модели к выявлению случаев с наличием и отсутствием осадков: для варианта без ассимиляции – 0,57, с ассимиляцией – 0,61 (табл. 3). Наибольшее положительное влияние ассимиляции радарных данных

на прогноз осадков также наблюдалось в летний период, что может быть связано с активными термодинамическими процессами в тропосфере [12]. Для прогнозов в зимний и переходный периоды процент ложных тревог оказался выше.

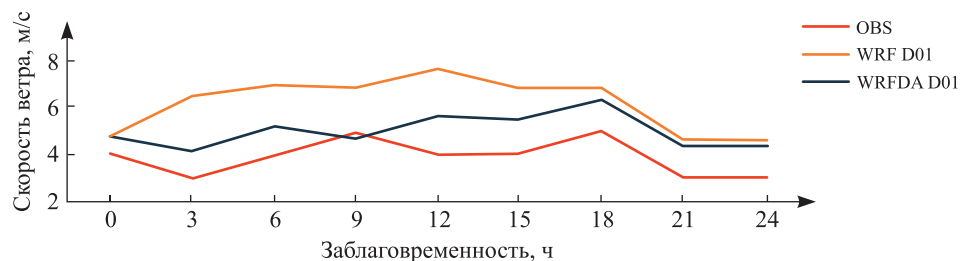


Рис. 2. Прогноз скорости приземного ветра на высоте 10 м, м/с: OBS – наблюдения на станции Верхнедвинска; WRF D01 – без ассимиляции; WRFDA D01 – с ассимиляцией. 24.08.2017 г.

Fig. 2. Wind speed forecast on the height 10 m, m/s: OBS – Verhnedvinsk station observations; WRF D01 – without assimilation; WRFDA D01 – with assimilation. 24.08.2017

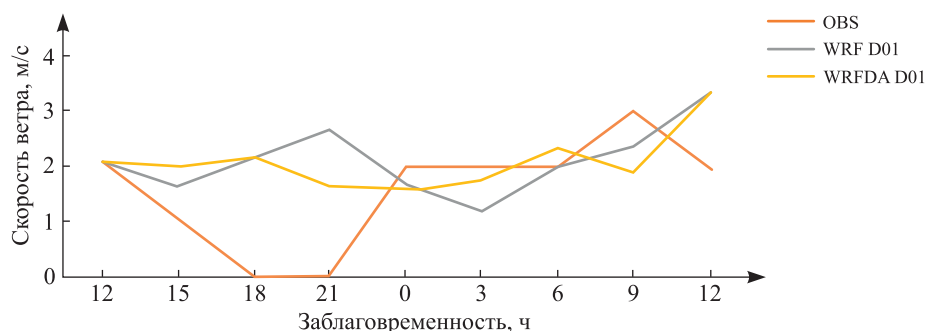


Рис. 3. Прогноз скорости приземного ветра на высоте 10 м, м/с: OBS – наблюдения на станции Мозыря; WRF D01 – без ассимиляции; WRFDA D01 – с ассимиляцией. 26.01.2019 г.

Fig. 3. Wind speed forecast on the height 10 m, m/s: OBS – Mozyr station observations; WRF D01 – without assimilation; WRFDA D01 – with assimilation. 26.01.2019

Таблица 3

**Статистическая оценка прогноза явления осадков для лета (+3, +6 ч)**

Table 3

**Statistic verification of precipitation phenomena for summer (+3, +6 h)**

| Показатели ошибки, % | Без ассимиляции | С ассимиляцией |
|----------------------|-----------------|----------------|
| PC                   | 78              | 79             |
| POD                  | 85              | 86             |
| PODN                 | 74              | 77             |
| FAR                  | 29              | 27             |
| HK                   | 0,57            | 0,61           |

Примером прогноза осадков с ассимиляцией и без нее данных радиолокаторов в летний период может стать случай 02.08.2017 г., когда наблюдалось прохождение активных фронтальных разделов циклона через территорию Беларуси, сопровождавшееся грозами различной интенсивности и шквалистым усилением ветра (рис. 4). Вариант с ассимиляцией (AS) более точно спрогнозировал выпадение осадков по северной части страны. Вариант без ассимиляции (NA) спрогнозировал центры выпадения осадков на значительном удалении – более 150 км от наблюдаемых. Это дает основание говорить о менее точном прогнозе местоположения для моделирования без ассимиляции. На рис. 5 представлен

график распределения прогноза количества выпавших осадков за 12 ч (с ассимиляцией (PRECIP AS) – 15 мм за 12 ч, без ассимиляции (PRECIP NA) – 0 мм за 12 ч).

Вариант без ассимиляции радиолокационных данных спрогнозировал области выпадения осадков на значительном удалении (более 150 км) от наблюдаемых на станции Верхнедвинска.

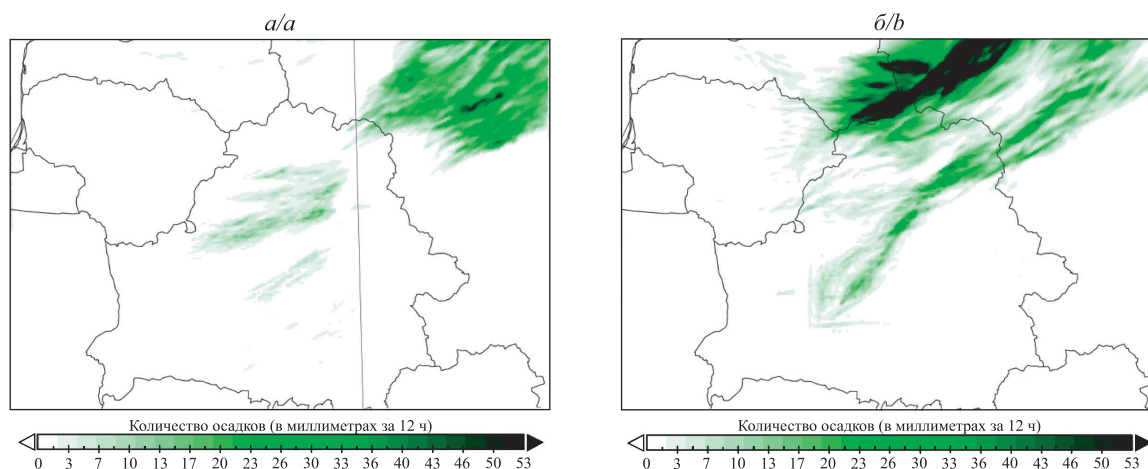


Рис. 4. Карта распределения осадков (в миллиметрах за 12 ч): а – с ассимиляцией данных (AS); б – без ассимиляции (NA). 02.08.2017 г.

Fig. 4. Map of precipitation distribution (in millimeters per 12 h): a – with data assimilation (AS); b – without assimilation (NA). 02.08.2017

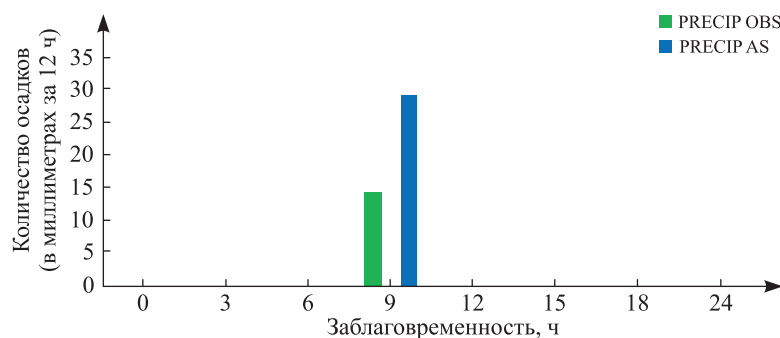


Рис. 5. Распределение количества осадков (PRECIP) с ассимиляцией (AS) и наблюдения на станции (OBS) Верхнедвинска. 02.08.2017 г.

Fig. 5. Precipitation distribution (PRECIP) with assimilation (AS) and observations at the station (OBS) Verkhnedvinsk. 02.08.2017

Наибольший интерес представляют результаты именно MODE-оценки, применяемой для анализа прогнозов высоколокализованных явлений (сильные осадки, сильный ветер, обледенения, турбулентность и др.) [11]. Именно метод MODE позволяет выполнить не только количественную оценку (оправдался – 100 %, не оправдался – 0 %), но и качественную (насколько близко было пространственное распределение поля осадков к реальному) [13]. Основным источником наблюдений проверки для выделенных объектов являются радиолокационные данные.

В 70 % случаев моделирования на территории Беларуси отмечались сильные осадки. Ассимиляция данных позволила спрогнозировать локализацию областей выпадения осадков значительно ближе к реальной и снизить количество ложных тревог, а также скорректировать пространственное распределение и ориентацию облачных систем, продуцирующих осадки. При этом оба варианта (с ассимиляцией и без нее) в 57 % промоделированных случаев дали превышение количества выпавших осадков над наблюдаемыми. Положительный эффект имел место только на первые 6–12 ч прогноза с ассимиляцией, это объясняется необходимостью учета новых данных для уточнения сформированной погодной ситуации в более поздние часы, особенно в летний период. Стоит отметить, что большинство используемых в мировой практике систем ассимиляции работают в циклическом режиме, с притоком новых метеорологических данных между основными сроками прогноза моделей (00; 06; 12; 18 ч UTC).



В случае сильных осадков (24.08.2017) ассимиляция данных позволила более точно спрогнозировать второй пик их выпадения. Прогноз скорости ветра и его порывов является одним из наиболее сложных по прогнозированию параметров. Анализ распределения ошибок прогноза скорости ветра на высоте 10 м показал абсолютное улучшение в варианте с ассимиляцией: наименьшая средняя ошибка прогноза с ассимиляцией составила на +15 ч прогноза 1,5 м/с, наибольшая достигала на +18 ч прогноза 3,6 м/с.

Оценка показателей отношения площадей наблюдаемых зон осадков к смоделированным для варианта с ассимиляцией радиолокационных данных – 2,5, без усвоения – 0,4, что говорит о более точном прогнозе площади выпадения сильных осадков и уменьшении показателя ложных тревог в случае с ассимиляцией для летнего периода (24.08.2017) (рис. 6). Прогноз местоположения оказался более точным в варианте с ассимиляцией данных: 4 объекта из 10 находились на расстоянии менее 50 км от реальных. Для сравнения: без ассимиляции в радиусе 50 км обнаружен только 1 объект (табл. 4).

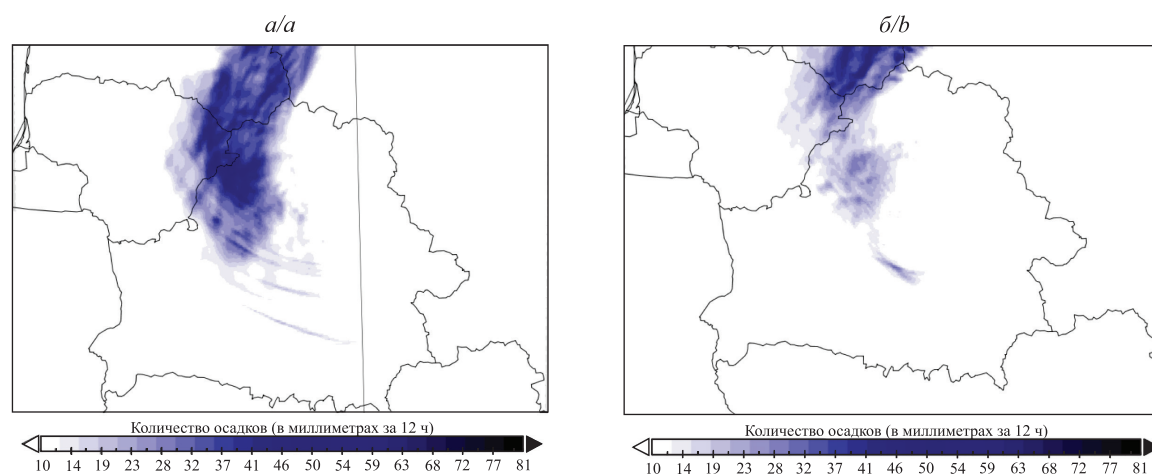


Рис. 6. Карты зон осадков для MODE-оценки: а – без ассимиляции; б – с ассимиляцией. 24.08.2017 г.

Fig. 6. Maps of precipitation areas for MODE verification: a – without assimilation; b – with assimilation. 24.08.2017

Таблица 4

**Результаты MODE-оценки прогноза местоположения и количества осадков для территории Беларуси (область D02, +3 ч, 24.08.2017)**

Table 4

**The results of MODE verification of precipitation forecast for the territory of the Republic of Belarus (region D02), +3 h, 24.08.2017)**

| Критерии MODE-оценки                                         | OBS | WRF | WRFDA |
|--------------------------------------------------------------|-----|-----|-------|
| Количество объектов                                          | 8   | 9   | 10    |
| Отношение площадей наблюдаемых зон осадков к смоделированным | –   | 0,4 | 2,5   |
| Интенсивность, мм/ч                                          | 6   | 0,2 | 11    |
| Удаленность менее чем на 100 км                              | –   | 2   | 4     |
| Удаленность менее чем на 50 км                               | –   | 1   | 4     |

Комплексный анализ случаев моделирования погодных условий на территории Беларуси в различные сезоны года говорит о возможности использования результатов исследования для прогноза опасных явлений, связанных с конвекцией (осадки, ветер) в летний период.

Результаты работы системы мезомасштабного прогнозирования с ассимиляцией радиолокационных данных на базе модели WRF могут быть использованы в компоненте «прогностический радар» (наукастинг) системы «ГИС-метео». Современные системы наукастинга используют прогнозы численных моделей с ассимиляцией радиолокационных и спутниковых данных, что позволяет преодолеть «разо-

грев» гидродинамической модели (спинап) на первых часах прогнозирования, связанный с несогласованностью метеорологических начальных полей, и уменьшить ошибку прогноза локализации облачных структур и зон осадков [14].

При прогнозе положения зон осадков и опасных явлений погоды (ливни, грозы, град) в компоненте «прогностический радар» применяется траекторная модель, построенная на изобарической поверхности, соответствующей уровню максимальной отражательной способности ДМРЛ. Для прогноза перемещения грозových ячеек используется параметр конвергенции потока влаги в приземном слое (MFC) [15]. Удельное влагосодержание рассчитывается по данным об относительной влажности на уровне станции, учет ветра производится в модели пограничного слоя.

### Заключение

Представлены варианты использования результатов прогнозов численной мезомасштабной модели WRF-ARW с ассимиляцией радиолокационного ветра и отражаемости для прогноза опасных явлений погоды на территории Беларуси. Авторами был проведен ряд численных экспериментов (2017–2020) и сделаны статистическая и объектно ориентированная оценки (MODE) влияния ассимилированных данных на результаты прогноза.

Оценка результатов моделирования случаев опасных и неблагоприятных явлений погоды на территории Беларуси с помощью двух различных подходов показала положительное влияние на прогноз приземного ветра и осадков. Прогноз ветра (+6 ч) улучшился за счет уменьшения среднеквадратической ошибки на 0,92 м/с. Статистическая оценка прогноза осадков показала улучшение общей оправдываемости прогнозов на 1 % для варианта с ассимиляцией радиолокационных данных в летний период [16]. Кроме того, объектно ориентированный анализ продемонстрировал сокращение площадей зон выпадения сильных осадков и более корректное расположение данных зон по сравнению с вариантом без ассимиляции. При этом оба варианта показали завышение прогнозируемых площадей зон осадков (ложные тревоги) относительно наблюдаемых с помощью ДМРЛ. Разработанная система прошла предварительное тестирование в Белгидромете и рекомендуется к использованию для уточнения прогнозов ветра и осадков в летний период на территории Беларуси. Тестирование в системе наукастинга Белгидромета показало, что полученные прогнозы модели WRF с ассимиляцией данных могут успешно применяться в качестве исходных в компоненте «прогностический радар» комплекса «ГИС-метео».

### Библиографические ссылки

1. Gustafsson N, Janjic T, Schraff C, Leuenberger D, Weissmann M, Reich H, et al. Survey of data assimilation methods for convective-scale numerical weather prediction at operational centres. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2018;144:1218–1256. DOI: 10.1002/qj.3179.
2. Готюр ИА, Девяткин АМ, Жуков ВЮ, Кулешов ЮВ, Щукин ГГ. Информационные возможности доплеровских метеорологических радиолокаторов с двойной поляризацией. *Ученые записки РГГМУ*. 2013;32:66–82.
3. Зайко ПО. Система усвоения наземных и аэрологических наблюдений в мезомасштабную численную модель WRF-ARW в Белгидромете. *Природные ресурсы*. 2019;1:89.
4. Vulpiani G, Montopoli M, Passeri LD, Gioia AG, Giordano P, Marzano FS. On the use of dual-polarized C-band radar for operational rainfall retrieval in mountainous areas. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2012;51(2):405–425. DOI: 10.1175/JAMC-D-10-05024.1.
5. Crisoligo I, Vulpiani G, Abon CC, David CPC, Bronstert A, Heistermann M. Polarimetric rainfall retrieval from a C-band weather radar in a tropical environment (The Philippines). *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*. 2014;50(1):595–607. DOI: 10.1007/s13143-014-0049-y.
6. Зайко ПО. Ассимиляция метеорологических данных в мезомасштабную численную модель WRF-ARW в Республике Беларусь. *East European Scientific Journal*. 2020;55(2):4–12.
7. Ипатов ВМ, Шутяев ВП. *Алгоритмы и задачи ассимиляции данных для моделей динамики атмосферы и океана*. Долгопрудный: МФТИ; 2013. 30 с.
8. Логинов ВФ, Бровка ЮА, Микуцкий ВС. Изменение климата, экстремальных погодных и климатических явлений и их связь с типами циркуляции атмосферы Северного полушария по Б. Л. Дзердзеевскому. *Природопользование*. 2013;24:5–10.
9. Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Barker DM, Duda MG, et al. *A description of the Advanced Research WRF Version 3 (No. NCAR/TN-475+STR)*. Boulder: National Center for Atmospheric Research; 2008. 125 p. DOI: 10.5065/D68S4MVH.
10. Деменцова ИА и др., составители. *Методическое пособие по верификации мезомасштабных прогнозов*. Минск: Белгидромет; 2014. 35 с.
11. Зарипов РБ, Павлюков ЮБ, Шумилин АА, Травов АВ. Использование радиолокационной информации при оценке прогноза погоды с высоким разрешением. *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2018;2:60–86.
12. Шлендер ТВ, Жучкевич ВВ, Красовский АН. Региональное влияние стратосферных процессов в формировании погоды и климата Республики Беларусь по данным мониторинга. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2018;2:25–38.

13. Павлюков ЮБ, Зарипов РБ, Лукьянов АН, Шестакова АА, Шумилин АА, Травов АВ. Оценка информативности радиолокационных данных при анализе состояния атмосферы в Московском регионе. *Метеорология и гидрология*. 2017;6:5–21.
14. Иванова АР, Шакина НП. Перспективы развития наукастинга для метеорологического обеспечения авиации в рамках реализации Глобального аэронавигационного плана (ГАНП). *Труды Гидрометцентра России*. 2016;360:113–134.
15. Юсупов ЮИ. Наукастинг в технологии ГИС-метео. *Метеоспектр*. 2015;1:43–49.
16. Borderies M, Caumont O, Delanoë J, Ducrocq V, Fourrie N, Marquet P. Impact of airborne cloud radar reflectivity data assimilation on kilometre-scale numerical weather prediction analyses and forecasts of heavy precipitation events. *Natural Hazards Earth System Sciences*. 2019;19(4):907–926. DOI: 10.5194/nhess-19-907-2019.

## References

1. Gustafsson N, Janjic T, Schraff C, Leuenberger D, Weissmann M, Reich H, et al. Survey of data assimilation methods for convective-scale numerical weather prediction at operational centres. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2018;144:1218–1256. DOI: 10.1002/qj.3179.
2. Gotyur IA, Deviatkin AM, Zhukov VY, Kuleshov UV, Shchukin GG. The informational capabilities of doppler weather radar with dual polarization. *Uchenye zapiski RGGMU*. 2013;32:66–82. Russian.
3. Zaiko PO. [System of assimilation of ground and upper-air observations into the mesoscale numerical model WRF-ARW at Belhydromet]. *Prirodnye resursy*. 2019;1:89. Russian.
4. Vulpiani G, Montopoli M, Passeri LD, Gioia AG, Giordano P, Marzano FS. On the use of dual-polarized C-band radar for operational rainfall retrieval in mountainous areas. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2012;51(2):405–425. DOI: 10.1175/JAMC-D-10-05024.1.
5. Crisologo I, Vulpiani G, Abon CC, David CPC, Bronstert A, Heistermann M. Polarimetric rainfall retrieval from a C-band weather radar in a tropical environment (The Philippines). *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*. 2014;50(1):595–607. DOI: 10.1007/s13143-014-0049-y.
6. Zaiko PO. Meteorological data assimilation in mesoscale numerical model WRF-ARW in the Republic of Belarus. *East European Scientific Journal*. 2020;55(2):4–12. Russian.
7. Ipatova VM, Shutyayev VP. *Algoritmy i zadachi assilyatsii dannykh dlya modelei dinamiki atmosfery i okeana* [Algorithms and data assimilation problems for models of atmospheric and oceanic dynamics]. Dolgoprudny: Moscow Institute of Physics and Technology; 2013. 30 p. Russian.
8. Loginov VE, Brovka JA, Mikutskiy VS. Change of climate, extreme weather and climatic phenomena and their link with types of atmospheric circulation of Northern hemisphere by B. L. Dzerdzeevskii. *Prirodopol'zovanie*. 2013;24:5–10. Russian.
9. Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Barker DM, Duda MG, et al. *A description of the Advanced Research WRF Version 3 (No. NCAR/TN-475+STR)*. Boulder: National Center for Atmospheric Research; 2008. 125 p. DOI: 10.5065/D68S4MVH.
10. Dementsova IA, et al., compilers. *Metodicheskoe posobie po verifikatsii mezomasshtabnykh prognozov* [Methodological guide for verification of mesoscale forecasts]. Minsk: Belgydromet; 2014. 35 p. Russian.
11. Zariyov RB, Pavlyukov YuB, Shumilin AA, Travov AV. Application of radar information for verification of the high-resolution numerical weather prediction. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*. 2018;2:60–86. Russian.
12. Shlender TV, Zhuchkevich VV, Krasouski AN. Regional influence of stratospheric processes in the formation of weather and climate of the Republic of Belarus employing monitoring data. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*. 2018;2:25–38. Russian.
13. Pavlyukov YB, Zariyov RB, Luk'yanov AN, Shestakova AA, Shumilin AA, Travov AV. The impact of radar data assimilation on atmosphere state analysis in the Moscow region. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2017;6:5–21. Russian.
14. Ivanova AR, Shakina NP. Future development of nowcasting for aviation meteorological service in the framework of Global aeronavigation plan (GANP) implementation. *Trudy Gidromettsentra Rossii*. 2016;360:113–134. Russian.
15. Yusupov YuI. [Naukasting v tekhnologii GIS Meteo]. *Meteospekt*. 2015;1:43–49. Russian.
16. Borderies M, Caumont O, Delanoë J, Ducrocq V, Fourrie N, Marquet P. Impact of airborne cloud radar reflectivity data assimilation on kilometre-scale numerical weather prediction analyses and forecasts of heavy precipitation events. *Natural Hazards Earth System Sciences*. 2019;19(4):907–926. DOI: 10.5194/nhess-19-907-2019.

Статья поступила в редколлегию 04.08.2020.  
Received by editorial board 04.08.2020.