

Влияние ассимиляции данных доплеровского метеорологического лоатора в мезомасштабную численную модель WRF-ARW на прогноз осадков на территории Республики Беларусь

П.О. Зайко (Polly_LO@tut.by)^{1,2}

¹Белорусский государственный университет, физический факультет, г. Минск, Республика Беларусь; ²ГУ «Государственное учреждение "Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды», г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье представлены результаты оценки влияния ассимиляции отражаемости и радиальной скорости, с сети белорусских доплеровских метеорологических лоаторов (ДМРЛ), в численную мезомасштабную модель WRF-ARW (Weather Research and Forecasting) на прогноз осадков на территории Республики Беларусь. Автором была разработана двухуровневая система контроля и подготовки радиолокационных данных для их усвоения в модель WRF-ARW на основе метода трехмерного вариационного усвоения (3D-VAR). Были промоделированы случаи выпадения осадков в 3 пространственных разрешениях (9, 3 и 1 км) на территории Беларуси в летний и зимний период с усвоением радиолокационных данных и без усвоения, с помощью адаптированной системы ассимиляции в Белгидромете. Результаты статистической и объект-ориентированной оценки промоделированных случаев позволяют говорить об уменьшении ошибки прогноза скорости ветра на 10 м, а также об уточнении прогноза местоположения центров выпадения осадков, ориентации и структуры облачных систем в варианте с усвоением.

Ключевые слова: численный прогноз погоды, WRF-ARW, система ассимиляции (усвоения) данных, доплеровский метеорологический лоатор (ДМРЛ), объективный анализ, оценка.

Введение

Численный прогноз погоды успешно позволяет моделировать опасные явления (ОЯ) погоды конвективного масштаба (ливни, грозы, шквалистое усиление ветра и т.д.). Именно конвективные ОЯ наносят наибольший экономический ущерб сельскому и лесному хозяйству, транспорту Беларуси [4].

Прогноз конвективных явлений является одной из основных задач численного прогноза и требуют построения более точных начальных и граничных условий для последующего моделирования. Основным способом уточнения начальных данных для модели является ассимиляция (усвоение) метеорологических данных [6]. Ассимиляция данных представляет собой процесс построения уточненного начально состояния атмосферной системы с помощью привлечения дополнительных наблюдений, учета ошибок прогноза и наблюдений, и их последующего согласования. При усвоении наблюдений производится обязательный контроль качества информации, корректировка исходных данных с помощью математических методов и последующее согласование полей.

Ведущие мировые метеорологические центры (Météo-France, MetOffice и др.) и Консорциумы (HIRLAM, COSMO, ALADIN и др.), производят моделирование погодных процессов и используют для уточнения начальных данных наземные и аэрологические, спутниковые, радиолокационные, самолетные наблюдения с территорий стран участников.

Ассимиляция данных доплеровских метеорологических локаторов (ДМРЛ) представляет наибольший интерес, в связи с возможностью получения поля ветра, информации об облаках, грозových ячейках и их микрофизической структуре в высоком временном (10 минут) и пространственном разрешении (250 км) на территории Беларуси.

В связи с тем, что Республика Беларусь не входит в состав крупных метеорологических Консорциумов усвоение радиолокационных данных с сети белорусских ДМРЛ (Минск-2, Гомель, Витебск) является национальной задачей.

В 2014 году в Белгидромете была создана национальная система мезомасштабного прогноза на основе модели WRF-ARW, позволяющая моделировать прогнозы высокого пространственного разрешения (3 км) для территории страны. Кроме того, в Белгидромете разработана технология мезомасштабного прогноза для территории Беларуси, включающая системы контроля и подготовки наземных, аэрологических и радиолокационных для последующего усвоения в адаптированную систему ассимиляции на основе трехмерного вариационного метода (3D-VAR).

Основной целью статьи была оценка влияния усвоения горизонтальной отражаемости и радиальной скорости с сети белорусских ДМРЛ на прогноз осадков мезомасштабной модели WRF-ARW по территории Беларуси. Для оценки влияния ассимиляции радиолокационных данных на результаты прогноза был проведен ряд численных экспериментов, включающих случаи выпадения осадков в различные сезоны года на территории Беларуси.

Материалы и методы.

В 2016 году в рамках научно-исследовательской работы в Белгидромете были разработаны первые адаптированные компоненты системы ассимиляции метеорологических данных, включающие усвоение наземных (50 станций Беларусь + 1700 станций Европа) и аэрологических данных методом Крессмана в систему мезомасштабного прогнозирования на базе модели WRF-ARW в Белгидромете. В систему усваивались давление на уровне моря и станции, температуры и точки росы на 2 м, скорости и направления ветра, абсолютная высота изобарических поверхностей 1000, 850, 700, 500гПа и др., температура, дефицит точки росы, скорость и направление ветра на соответствующих изобарических поверхностях. Ассимиляция данных наблюдений позволила уменьшить ошибку прогноза приземного давления по модели WRF-ARW на +24 ч на 8%, а также сократить количество ложных тревог в прогнозе осадков [2].

Второй этап включал разработку компонента адаптированной системы ассимиляции в Белгидромете, позволяющего усваивать наблюдения ДМРЛ по территории Беларуси. Разработка технологии ассимиляции радиолокационных данных включала: создание системы контроля и подготовки радиолокационных данных для последующей ассимиляции и реализацию адаптированной системы ассимиляции радиолокационных данных в мезомасштабную численную модель WRF-ARW на базе метода 3D-VAR в Белгидромете.

На территории Беларуси установлено 3 ДМРЛ с двойной поляризацией (Минск-2, Гомель, Витебск) (рис.1), в будущем планируется установка ДМРЛ в г. Брест и г. Гродно. ДМРЛ позволяют получать уникальную информацию распределении ветра и влагозапасе, производя съемку в 2 режимах (отражаемость, скорость) в реальном времени (10 минут), и в радиусе 250 км, на 34 уровнях, охватив большую часть страны. В качестве основных параметров для усвоения используются горизонтальная отражаемость (DBZH), радиальная скорость (VRAD) и ширина спектра (WRAD).

Одной из важнейших задач в технологии ассимиляции радиолокационных наблюдений является контроль качества и подготовки данных. Это связано со спецификой радиолокационных наблюдений: получаемые метеорологическим локатором эхо-сигналы могут формироваться не только метеорологическими целями (облака, осадки и т.д.), но и не

метеорологическими объектами (насекомые, птицами, самолеты, здания, горы, электромагнитные излучатели и т.д.) [1; 5; 7].

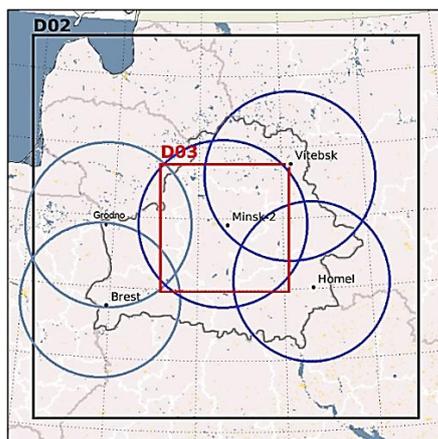


Рисунок 1 – Карта расположения и охвата территории ДМРЛ (Минск-2, Гомель, Витебск), ДМРЛ Брест и Гродно (планируемые), относительно моделируемых в численном эксперименте областей (D02, D03)

Автором была разработана система контроля качества, использующая данные ДМРЛ в формате (ODIM HDF5): коэффициент отражаемости горизонтальной поляризации (DBZH), радиальную скорость (VRAD), ширину доплеровского спектра радиальных скоростей (WRAD), дифференциальную отражаемость (ZDR), коэффициент кросскорреляции (RHOV), дифференциальную фазу (PHIDP).

На первом этапе используется 2-ухуровневая фильтрация на основе фильтра Габелла [7]. Алгоритм данного фильтра производит удаление помех от местных объектов (рельеф, здания и т.д.), имеющих значительную пространственную неоднородность и изменчивость распределения сигнала, что позволяет выделить не метеорологические объекты на основе анализа отражаемости. Затем анализируется пространственная непрерывность распределения сигнала в пределах ячейки наблюдений на превышение порогового значения, в результате чего шум считается не метеорологическим.

Второй метод контроля радиолокационных данных включает программы идентификации помех на основе нечеткой логики для характеристик двойной поляризации (fuzzy echo classification). Для анализа используются: дифференциальная отражаемость (ZDR); коэффициент корреляции между горизонтальной и вертикальной отражаемостями (RHOV); дифференциальная фаза (PHIDP); доплеровская скорость (VRAD); статическая карта помех. Для каждой из этих переменных алгоритм использует трапецидальную функцию для определения принадлежности радиозохи к не метеорологическому. Затем производится расчёт линейной комбинации степеней принадлежности на основе определенных заранее весов, при превышении комбинацией порогового значения эхо-сигнал считается не метеорологическим [5].

Далее отфильтрованные данные ДМРЛ проходят конечную подготовку для ассимиляции: преобразование в координаты системы моделирования WRF-ARW, пересчет компонент скорости ветра и горизонтальной отражаемости на реальные высоты и представление данных в формате, требуемом системой ассимиляции данных. Стоит отметить, что получаемая с ДМРЛ радиальная скорость частиц, не является синонимом реальной скорости ветра, и требует восстановления вектора полной скорости [1].

Ассимиляции радиолокационных данных в модель WRF-ARW.

Радиолокационные данные ассимилируются методом 3D-VAR. Данный метод используется для ассимиляции наземных, спутниковых и радиолокационных наблюдений в системах ALADIN, HIRLAM, MetOffice и др. [6].

В основе метода лежит в минимизации функционала от искомого вектора состояния системы X . Этот функционал представляет собой степень несогласованности X с прогностическими данными и наблюдениями. Для минимизации функционала применяется метод сопряженных градиентов, который базируется на оценке изменения контрольных переменных (температура, удельная влажность, давление на уровне земли, завихренность и дивергенция) [6]:

$$J(X) = \frac{1}{2}(X - X^f)^T B^{-1}(X - X^f) + \frac{1}{2}(X^{obs} - HX)^T R^{-1}(X^{obs} - HX), \quad (1)$$

где X – вектор, представляющий искомое поле; X^f – поле прогноза по гидродинамической модели атмосферы; X^{obs} – вектор наблюдений; B – матрица ковариаций ошибок прогноза; R – матрица ковариаций ошибок наблюдений; H – оператор наблюдений, связывающий наблюдения с истинным состоянием атмосферы.

Ассимиляция данных об отражаемости может производиться как напрямую в модель WRF-ARW через отношение между массовым содержанием дождевых капель (соотношение Маршалла-Палмера для дождевых капель), так и косвенно через оценку влажностных характеристик в облаке, включая снег, крупу и др. В разработанной системе ассимиляции применяется второй метод [6].

Ассимиляция данных о ветре производится путем пересчета радиальной скорости данных в переменные модели: радиальный ветер Vr можно определить, используя компоненты ветра (u, v, w), вертикальную скорость движения гидрометеоров (связанную с дождевыми каплями) Vt , и расстоянием от радара до данной точки. Вертикальная скорость Vt рассчитывается из массового содержания дождевых капель q_r с коррекцией высоты [6]:

$$Vr = u \frac{x - x^0}{r} + v \frac{y - y^0}{r} + (w - v_t) \frac{z - z^0}{r}, \quad (2)$$

$$v_t = 5.40 \left(\frac{p_s}{p} \right)^{0.4} (q_r)^{0.125}, \quad (3)$$

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), p – давление на станции.

Для оценки влияния ошибок прогноза модели WRF-ARW на результаты ассимиляции была построена ковариационная матрица фоновых ошибок прогноза модели за летний период 2017 г. и зимний 2020 г., на основе метода NMC (Пэрриш и Дербер), в котором предполагает, что статистическая структура ошибок прогноза изменяется незначительно в пределах 48 ч [6].

Вычислительный эксперимент.

Для оценки влияния усвоения отражаемости и радиальной скорости на результаты прогноза модели WRF-ARW были промоделированы случаи выпадения сильных осадков на территории Беларуси летом 2017 г. и в зимний период 2020 г., зафиксированные ДМРЛ.

Применяемая для эксперимента модель WRF-ARW является негидростатической, используя схемы параметризации для описания физических процессов подсеточного масштаба (микрофизические, конвективные и др.), и способна воспроизводить конвективные облачные системы с в высоком пространственном разрешении [8]. В качестве граничных и

начальных данных для усвоения использовался прогноз глобальной модели GFS (Global Forecast System) [2]. Подготовленные радиолокационные наблюдения усваивались в срок близкий к исходному сроку прогноза (00 и 12 UTC) во временном окне ± 1 ч, методом 3D-VAR [6]. Прогноз моделировался с заблаговременностью +24 ч, в 3 пространственных разрешениях: 9, 3 и 1 км (рис. 2) (табл. 1).



Рисунок 2 – Карта областей моделирования D01 (9 км), D02 (3 км), D03 (1 км)

Таблица 1

Описание основных параметров моделирования

ЧПП	WRF-ARW 4.0
Начальные и граничные условия	GFS (Global Forecast System), 3 ч, $0.25^\circ \times 0.25^\circ$
Гор. и верт. разрешение	9 км (300×300), 3 км (300×300), 1 км (300×300). 40 Eta
Дни прогноза (исх. срок)/+24 ч. Окно усвоения	2017-08-10 (00 UTC), 2020-02-18 (12 UTC)/ ± 60 мин
Параметризации процессов:	WSM6; Каина – Фритша
Метод ассимиляции данных. Радиолок. данные	3D-VAR. Отражаемость (250 км), радиальная скорость (150 км), 13 вертикальных уровней.

Оценка результатов ассимиляции радиолокационных данных на прогноз численной модели WRF.

Для оценки влияния ассимиляции данных ДМРЛ на прогноз проводилась статистическая и объект-ориентированная оценка (по данным ДМРЛ, MODE (Method for Object-Based Diagnostic Evaluation)) [3]. Именно метод MODE позволяет произвести не только количественную оценку («оправдался - 100%», «оправдался – 50%», «не оправдался – 0%»), но и качественную (насколько близко было пространственное распределение поля осадков к реальному).

В качестве летнего варианта для представления был выбран случай 24 августа 2017 г.. По северу-западу Беларуси наблюдалось выпадение сильных осадков, продуцируемых облачными системами фронтальных разделов южного циклона. Анализ карт высоты геопотенциальных поверхностей 850, 700, 500 и 300 гПа, позволил зафиксировать динамические структуры в виде высотного циклона на картах вариантов с усвоением (AS) и без (NA). При сравнении вариантов отмечается изменение положения барического центра и поля температуры на высотах в AS, что могло повлиять на время и интенсивность выпадения осадков. Определение положения высотных фронтальных разделов является весьма интересной задачей, в связи с возможностью перемещения вдоль этих зон мощных циклонических образований. Продвижение холодного фронта по территории страны прослеживается и на картах распределения скоростей и направлений ветра AT850. Если в

варианте без усвоения граница фронта более четкая, имеющая в северо-восточной части вихревую структуру, то в варианте с ассимиляцией фронт размыт.

Результаты оценки MODE прогноза с усвоением ДМРЛ за 00 UTC 24.08.2017 г. подтверждает более точный прогноз центров выпадения осадков в пределах страны. Основным видом информации для выделенных исходных объектов осадков являлись наблюдения ДМРЛ. На рисунке 3 представлены результаты моделирования распределения и количества осадков за 12 ч на 24.08.2017 г. на +3 ч, +6 ч, +9 ч, +12 ч, +15 ч UTC и карты распределения поля смоделированной максимальной радиолокационной отражаемости за те же часы.

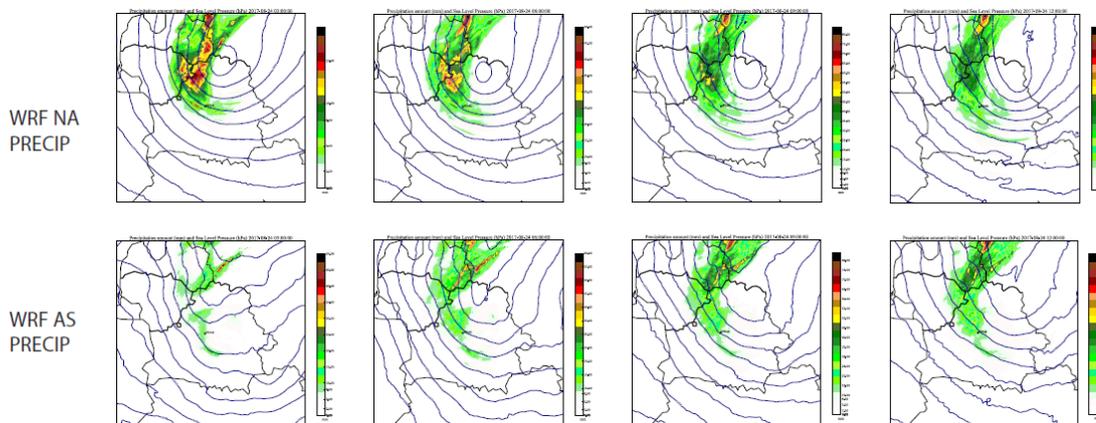


Рисунок 3 – Карты распределения зон выпадения осадков на +3 ч, +6 ч, +9 ч, +12 ч, +15 ч UTC, WRF NA PRECIP – без усвоения, WRF AS PRECIP – с усвоением, 24.08.2017

Анализ прогнозов 2 вариантов показал: прогноз без усвоения (NA) зафиксировал зоны осадков (объектов) на значительном удалении (более 100 км) от данных ДМРЛ. Оценка площади выделенных объектов показала, что вариант NA значительно переоценивает площади выпадения осадков. Несмотря на это, интенсивность осадков на +3 ч была значительно ниже (0.2 мм/ч), чем по данным ДМРЛ (6 мм/ч). Показатель отношения площадей наблюдаемых зон осадков к смоделированным для WRF AS (с усвоением) – 2.5, для WRF NA (без усвоения) – 0.4, что говорит о уменьшении показателя ложных тревог в варианте с усвоением. Местоположение объектов точнее смоделировал варианте с усвоением ДМРЛ: около половины объектов (4 шт.) находились на расстоянии менее 50 км от реальных. Величина скорости ветра один из наиболее сложных по прогнозированию параметров.

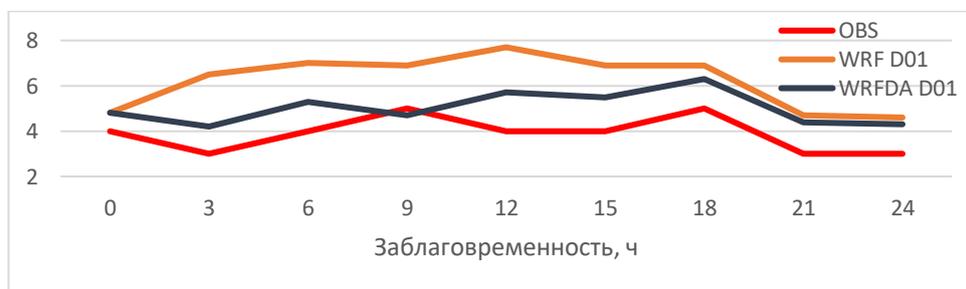


Рисунок 4 – График распределения прогноза скорости ветра на 10 м (м/с), OBS – наблюдения на ст. Верхнедвинск, WRF D01 – без усвоения, WRFDA D01 – с усвоением, 24.08.2017 г.

Анализ распределения ошибок прогноза скорости ветра на 10 м показал абсолютное улучшение в варианте с ассимиляцией (AS) (рис.4): наименьшая средняя ошибка прогноза с ассимиляцией (AS) составила на +15 ч прогноза – 1.5 м/с, наибольшая на +18 ч – 3.6 м/с.

В качестве второго случая моделирования было выбрано 18 февраля 2020 г. В данный день через территорию Беларуси и г. Минск проходил холодный грозовой фронт, что достаточно редкое явление в зимний период для территории страны. На метеостанции Минск выпадение осадков (3 мм) пришлось на первые 2 часа после ассимиляции данных ДМРЛ (Минск-2, Гомель, Витебск). Моделирование с усвоением данных ДМРЛ точнее отразило пространственную ориентацию фронта и зону выпадения осадков, что видно на карте радиолокационных наблюдений (рис.5). Зона выпадения осадков визуализировалась в виде линейной структуры, вытянутой с севера на юг, таким же образом было в варианте с ассимиляцией. Вариант без усвоения смоделировал область в виде эллипсоидов с ориентацией с запад-восток. Кроме того, усвоение данных позволило более точно смоделировать область выпадения осадков восточнее границ Беларуси.

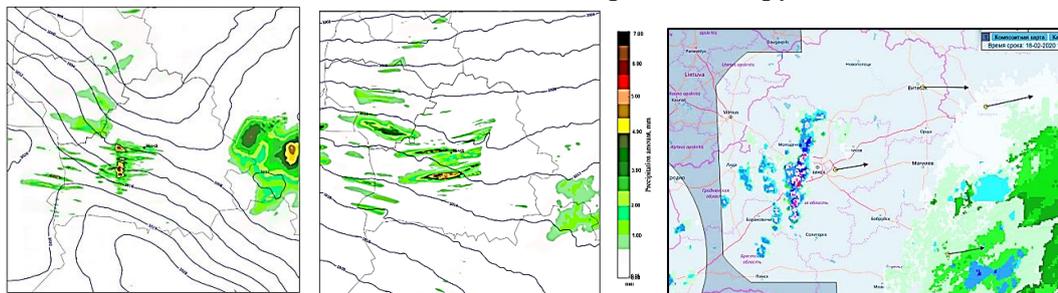


Рисунок 5 – Карты зон выпадения осадков область D02 на территории Беларуси 18.02.2020 г. 20 UTC, линии - приземное давление, слева – с усвоением, середина – без усвоения, справа – композитная карта наблюдений ДМРЛ «MeteoCube» (Белгидромет)

В 16 ч UTC фронт проходил через территорию минской области, и на станции Столбцы были зафиксирован осадки и шквалистое усиление ветра. Вариант с ассимиляцией данных позволил уменьшить абсолютную ошибку прогноза скорости ветра на 10 м в первые 5 часов моделирования, затем ошибка варианта с усвоением была больше (рис.6). Это может быть связано с более ранним формированием конвективных систем, продуцирующих осадки относительно начального срока усвоения: первый час выпадения осадков с ассимиляцией – +3 ч, без ассимиляции – +6 ч.

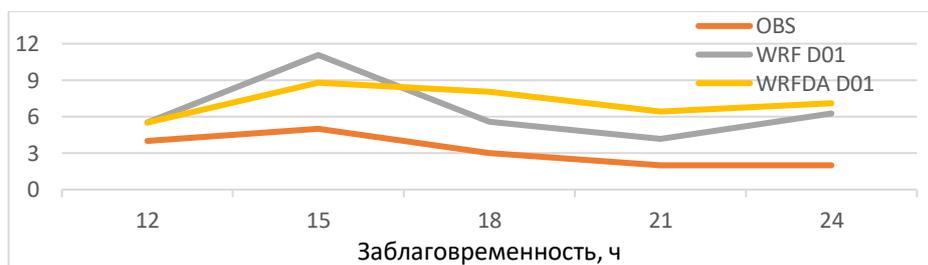


Рисунок 6 – График скорости ветра на 10 м (м/с) на станции Столбцы, OBS – наблюдения, WRF D01 – без ассимиляции, WRFDA D01 – с ассимиляцией, 18.02.2020 г.

Статистическая количественная оценка осадков на станции Столбцы говорит о превышении абсолютных значений для варианта с усвоением на +6 ч: наблюдалось – 0.6 мм, без усвоения – 0.59 мм, с усвоением – 1.39 мм.

Заключение

Автором были разработаны система контроля и подготовки данных белорусских ДМРЛ (Минск-2, Гомель, Витебск) для усвоения данных и адаптированная автоматизированная система ассимиляции радиолокационных данных в мезомасштабную модель WRF-ARW.

Разработанная система контроля и подготовки данных использует ступенчатую фильтрацию помех радиолокационных полей с помощью метода Габелла и фильтра нечеткой

логики, а также производит расчет координат и подготовку формата данных для усвоения в модель WRF-ARW методом 3D-VAR [2; 5; 7; 8].

Для оценки влияния усвоенных радиолокационных данных на результаты численного прогноза проведен ряд вычислительных экспериментов, включающий моделирование случаев выпадения ливневых осадков на территории Беларуси летний (2017 г.) и зимний (2020 г.), с ассимиляцией радиолокационных данных и без.

Ассимиляция отражаемости и радиальной скорости повлияла на уменьшение ошибки прогноза скорости ветра на 10 м, уточнение положения центров выпадения осадков на первых часах прогноза для летнего варианта. Объект-ориентированная оценка показала, что усвоение данных позволило спрогнозировать центры выпадения осадков на меньшем удалении от наблюдаемых, а также дать более точный прогноз интенсивности осадков. Несмотря на это оба варианта (с усвоением и без) имели ложные тревоги. В зимний период моделирование с ассимиляцией позволило отразить положение и ориентацию грозового фронта ближе к реальному и уменьшить ошибку прогноза скорости ветра на ранних часах прогноза. Несмотря на это на более поздних часах вариант без усвоения дал меньшую ошибку прогноза осадков и скорости ветра.

Предварительный анализ результатов работы адаптированной системы ассимиляции радиолокационных данных, говорит о возможности ее использования для целей сверх краткосрочного прогноза, а также для уточнения местоположения конвективных систем в летний период. Сейчас система требует более детального тестирования для случаев конвективного выпадения осадков на территории страны в летний период.

Список литературы

1. Готюр И.А и др. Информационные возможности доплеровских метеорологических радиолокаторов с двойной поляризацией // Ученые записки РГГМУ. – 2013. – № 32. – С. 66–83.
2. Зайко П.О. Система усвоения наземных и аэрологических наблюдений в мезомасштабную численную модель WRF-ARW в Белгидромете // Природные ресурсы. - РУП "Издательский дом «Белорусская наука»", 2019, №1. – с.89.
3. Травов А.В. Зарипов Р.Б., Павлюков Ю.Б., Шумилин А.А. Использование радиолокационной информации при оценке прогноза погоды с высоким разрешением/ Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. - ФГБУ «Гидрометцентра России», 2018. – 60-86 с.
4. Седьмое национальное сообщение Республики Беларусь в соответствии с обязательствами по Рамочной конвенции ООН об изменении климата // ООН [Эл. ресурс]. – URL: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/92104765_Belarus-NC7-1-AI_BLR_NC7.pdf (дата обращения: 15.03.2020 г.)
5. Gianfranco Vulpiani, Mario Montopoli, Luca Delli Passeri, Antonio G. Gioia, Pietro Giordano, and Frank S. Marzano. On the use of dual-polarized c-band radar for operational rainfall retrieval in mountainous areas. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(2):405–425, Feb 2012. doi:10.1175/JAMC-D-10-05024.1.
6. Gustafsson N., and Coauthors. Survey of data assimilation methods for convective-scale numerical weather prediction at operational centres // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2018. 144. P. 1218–1256.
7. Morin, E.; Gabella, M. Radar-based quantitative precipitation estimation over Mediterranean and dry climate regimes. *J. Geophys. Res.* 2007, 112, 1–13.
8. Skamarock W.C. et. al. A description of the Advanced Research WRF Version 3: NCAR Techn. Note/ ed.: Skamarock W.C. et al. Boulder // National Center for Atmospheric Research. 2008. P.125 p.