

П. О. Зайко

*Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения
и мониторингу окружающей среды (Белгидромет), Минск, Беларусь,
e-mail: Polly_LO@tut.by*

СИСТЕМА УСВОЕНИЯ НАЗЕМНЫХ И АЭРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ В МЕЗОМАСШТАБНУЮ ЧИСЛЕННУЮ МОДЕЛЬ WRF-ARW В БЕЛГИДРОМЕТЕ

Представлено описание автоматизированной системы усвоения наземных метеорологических и аэрологических данных наблюдений в мезомасштабную численную модель WRF (WRF-ARW), а также предварительные оценки результатов прогнозов. Данная система была разработана в Белгидромете Республики Беларусь в рамках выполнения научно-исследовательской работы «Разработка базовых элементов технологии мезопрогнозирования элементов погоды по территории Республики Беларусь на основе усвоения данных в численной модели WRF». Система направлена на уточнение полей объективного анализа и прогноза, за счет привлечения дополнительных метеорологических наблюдений. В результате система позволила скорректировать поля и уточнить прогнозы мезомасштабной численной модели WRF за исходный срок 00 UTC, а также улучшить показатели оправдываемости прогноза основных метеорологических величин (давление, температура и количество осадков) на ранних сроках моделирования.

Ключевые слова: моделирование, усвоение, прогноз, давление, температура, количество осадков, верификация

P. A. Zaiko

*Republican Center for Hydrometeorology, Radiation Control and Environmental Monitoring (Belhydromet), Minsk, Belarus,
e-mail: Polly_LO@tut.by*

THE SURFACE AND AEROLOGICAL OBSERVATION ASSIMILATION SYSTEM INTO THE MESOSCALE NUMERICAL MODEL WRF-ARW IN BELGIDROMET

The article describes the automated system for the assimilation of surface meteorological and aerological observational data into the mesoscale numerical model WRF (WRF-ARW), as well as preliminary verifications of the forecast results. This system was developed in the Belgidromet of the Republic of Belarus within the research work "Development of basic elements of the technology of mesoscale forecasting of weather elements on the territory of the Republic of Belarus on the basis of data assimilation in the numerical model of WRF". The system is aimed at clarifying the fields of objective analysis and forecast, by attracting additional meteorological observations. As a result, the system made it possible to correct the fields and refine the forecasts of the mesoscale numerical model WRF for the initial period of 00 UTC, as well as improve the accuracy of the forecast of the main meteorological values (pressure, temperature and precipitation) in the early simulation periods.

Keywords: modeling, assimilation, forecast, pressure, temperature, amount of precipitation, verification

П. А. Зайко

*Рэспубліканскі цэнтр па гідраметэаралогіі, кантролю радыёактыўнага забруджвання
і маніторынгу навакольнага асяроддзя (Белгідрамет), Мінск, Беларусь,
e-mail: Polly_LO@tut.by*

СІСТЭМА ЗАСВАЕННЯ НАЗЕМНЫХ І АЭРАЛАГІЧНЫХ НАЗІРАННЯЎ У МЕЗАМАСШТАБНУЮ ЛІКАВУЮ МАДЭЛЬ WRF-ARW У БЕЛГІДРАМЕЦЕ

Прадстаўлена апісанне аўтаматызаванай сістэмы засваення наземных метэаралагічных і аэралагічных дадзеных назіранняў у мезамасштабную лікавую мадэль WRF (WRF-ARW), а такжа папярэднія ацэнкі вынікаў прагнозаў. Дадзеная сістэма была распрацавана ў Белгідрамеце Рэспублікі Беларусь у рамках выканання навукова-даследчай працы «Распрацоўка базавых элементаў тэхналогіі мезапрагназіравання элементаў надвор'я па тэрыторыі Рэспублікі Беларусь на аснове засваення дадзеных у лікавую мадэль WRF». Сістэма накіравана на ўдакладненне палёў аб'ектыўнага аналізу і прагнозу, за кошт прыцягнення дадатковых метэаралагічных назіранняў. У выніку сістэма дазволіла скараціраваць палі і ўдакладніць прагнозы мезамасштабнай лікавай мадэлі WRF за зыходны тэрмін 00 UTC, а таксама палепшыць паказчыкі апраўдальнасці прагнозу асноўных метэаралагічных велічынь (ціск, тэмпература і колькасць ападкаў) на ранніх тэрмінах мадэлявання.

Ключавыя словы: мадэляванне, засваенне, прагноз, ціск, тэмпература, колькасць ападкаў, верыфікацыя

Введение. В последние десятилетия широкое распространение в практике составления прогнозов погоды получили численные математические модели. Использование моделей позволило достигнуть достаточно высоких показателей точности краткосрочных прогнозов.

Применение численных моделей на современном этапе для оперативного составления прогноза погоды предъявляет определенные требования: плотность сети метеорологических наблюдений должна быть достаточно высокой, так как данные наблюдений являются основным источником начальных условий для расчета модели; моделирование прогноза и сам анализ поступающей информации наблюдений требует использования высокопроизводительных вы-

числительных ресурсов (суперкомпьютеров) в связи с нарастающим объемом анализируемых данных и необходимостью высокой заблаговременности и высокого территориального разрешения; совершенствование описания физических процессов в моделях, позволяющие учесть процессы подсеточного масштаба; внедрение и применение современных систем ассимиляции (усвоения) метеорологических данных, позволяющих уточнять исходные поля за счет данных наземных и дистанционных методов наблюдения за атмосферой (аэрология, спутниковые наблюдения, радиолокация и т.д.).

В рамках научно-исследовательской работы в отделе численного моделирования прогнозов Белгидромета в 2017 г. была разработана автоматизированная система усвоения метеорологических данных в мезомасштабную численную модель WRF [1]. Система состоит из нескольких компонентов, позволяющих производить последовательный контроль, объективный анализ и пространственно-временное усвоение данных наземных и аэрологических наблюдений в используемую в оперативной работе систему мезомасштабного прогнозирования на основе модели WRF, а также последующее моделирование прогноза. В основе разработанного комплекса по обработке и усвоению данных лежит система объективного анализа и контроля OBSGRID [2], позволяющая производить обработку, контроль, интерполяцию и согласование дополнительных метеорологических полей с полями первого приближения (прогноза).

Основная цель данной работы – улучшить качество численного прогноза системы мезомасштабного прогноза на основе модели WRF за исходный срок 00 UTC за счет уточнения полей объективного анализа дополнительными данными с наземных и аэрологических станций за срок 06 UTC, не поступающих в международный обмен.

В рамках работы были решены следующие задачи: разработана автоматизированная система для выборки метеорологической информации из базы данных и подготовки файлов в специализированном формате, требуемом в системе усвоения; выполнена реализация системы контроля и усвоения метеорологических полей OBSGRID на базе вычислительного кластера Белгидромета; произведены расчеты мезомасштабной модели WRF с усвоенными данными синоптических и аэрологических наблюдений; выполнены расчеты статистических показателей оценки качества прогноза.

Дан обзор основных компонентов и подходов к разработанному в Белгидромете комплексу. Кроме того, представлены результаты статистических оценок прогнозов, смоделированных с помощью разработанной системы с привлечением данных наземных и аэрологических наблюдений.

Исходные материалы. Система мезомасштабного прогноза на основе модели WRF в Белгидромете. С 2014 г. в Белгидромете функционирует автоматизированный комплекс мезомасштабного прогнозирования для территории Республики Беларусь на основе модели WRF-ARW [3]. В основе модели WRF-ARW лежат негидростатические уравнения для сжимаемой жидкости, а для описания физических процессов подсеточного масштаба применяются схемы параметризации. Для достижения высокого разрешения и проведения вычислений мезомасштабного прогнозирования для ограниченных территорий в модель включена возможность организации проведения расчетов во вложенных областях с одно- или двухсторонним влиянием.

На данный момент в качестве рабочей оперативной версии для прогноза в Белгидромете используется модель WRF-ARW версии 3.7.1 для многопроцессорных систем с соответствующей системой подготовки данных WPS (WRF Preprocessing System). Моделирование производится несколько раз в день за исходные сроки 00, 06 и 12 UTC для нескольких областей с шагом по горизонтали 15 и 3 км, с центром на территории Республики Беларусь и реализовано на базе вычислительного кластера HP Blade System C7000 производительностью порядка 5,5 Tflops, 14 вычислительных узлов, 248 процессоров (рис. 1).

Для реализации системы мезомасштабного прогноза на основе модели WRF в Белгидромете разработана технологическая схема, которая представлена на рис. 2 [4].

Согласно технологической схеме реализация мезомасштабного прогноза на основе модели WRF с компонентами подготовки и контроля данных для усвоения включает следующие этапы: скачивание результатов прогноза глобальной модели GFS в коде GRIB2 с шагом 0,25°, дискретностью по времени 3 ч, заблаговременностью 48 ч, которые используются в качестве начальных и боковых граничных данных (условий); предварительная подготовка исходных данных с помощью пакета WRF Processing System (WPS); расчет прогноза метеорологических параметров с помощью модели WRF-ARW; постпроцессинг для подготовки выходной продукции модели для последующей визуализации карт и метеограмм результатов прогноза в GrADS, запись резуль-

Домен 1:
Шаг ($\Delta x, \Delta y$) – 15 км
($250 \times 240 = 60\,000$ узлов)
Домен 2:
Шаг ($\Delta x, \Delta y$) – 3 км
($586 \times 586 = 343\,396$ узлов)
Модельные η -уровни – 28
Проекция Ламберта
Изобарические уровни
до 50 гПа (~ 20 км)
Заблаговременность – 48 ч
Дискретность – 1 ч



Рис. 1. Характеристики мезомасштабной модели WRF (синий цвет – домен 3 км, красный цвет – домен 15 км)

татов в базы данных. Расчет прогноза явлений; верификация прогноза по сетке и по станциям с помощью пакета MET; интерполяция прогностических данных на пункты Республики Беларусь, запись в базу данных; запись в базу данных статистических характеристик качества прогноза; предоставление результатов прогноза пользователям в виде карт, графиков и табличных данных.

В 2017 г. в схему были включены следующие блоки: выборка наземных и аэрологических метеорологических данных для усвоения из базы данных *Climate*; подготовка файлов в формате *LITTLE_R*; контроль и усвоение наземных и аэрологических данных с помощью модуля *OBSGRID*; повторный расчет метеорологических параметров с помощью модели *WRF-ARW* с усвоенными данными за исходный срок 06 UTC.

Таким образом, в Белгидромете, согласно разработанной технологической схеме расчета модели WRF и обработки выходной продукции, стала возможной детализация прогноза основных метеорологических элементов и явлений погоды для пунктов, районов, областей территории Беларуси, а также уточнение прогноза за счет усвоения дополнительных наблюдений за исходный срок 06 UTC [5].

Методика усвоения данных и начальные данные. На первом этапе разработки и внедрения системы усвоения метеорологических данных в информационную систему Белгидромета был проведен теоретический анализ и обобщение используемых в мировой практике методов объективного анализа, как интерполяционных и вариационных, а также применяемых систем усвоения. Была изучена научная литература и дана оценка возможности внедрения применяемых в других метеорологических центрах методов в существующую систему мезомасштабного прогнозирования на основе модели WRF в Белгидромете.

Под термином «объективный анализ» понимается процесс анализа существующих метеорологических полей, который сопровождается применением интерполяционных методов, методов

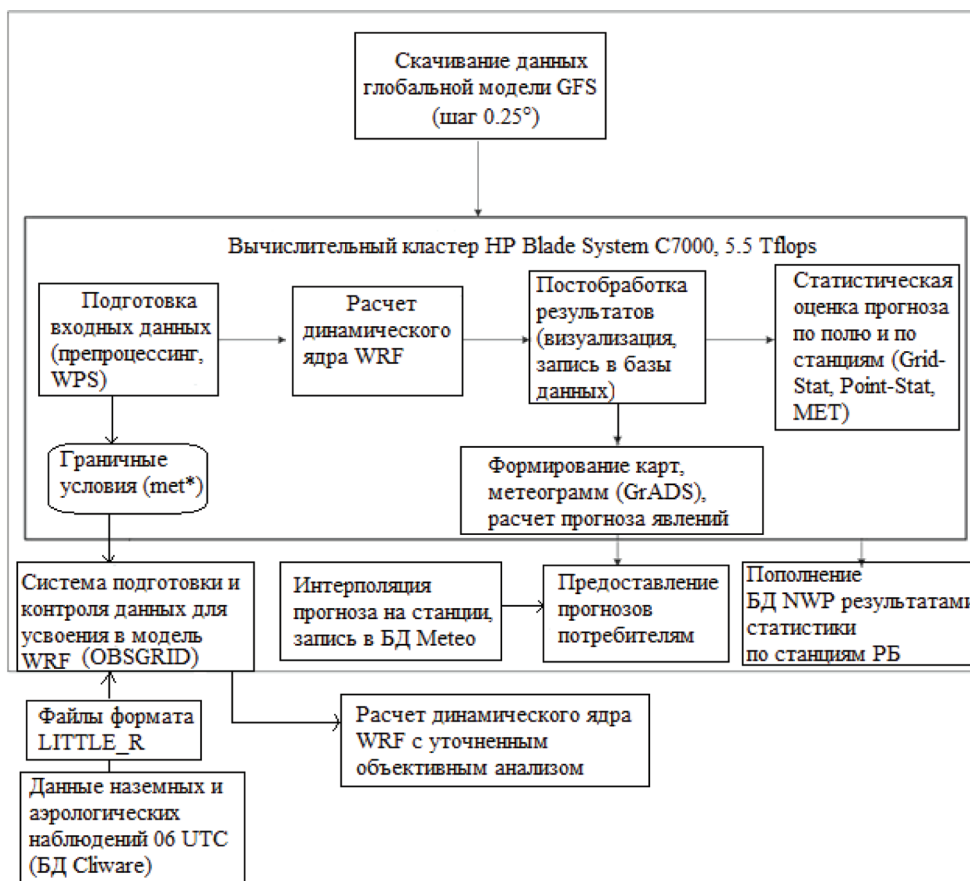


Рис. 2. Общая технологическая схема комплекса мезомасштабного прогноза на основе модели WRF с компонентами подготовки и контроля данных для усвоения в модель

согласования метеорологических полей, с последующим контролем и удалением возникающих ошибок, целью которого является построение более точных полей метеорологических наблюдений [6]. Процесс объективного анализа подразделяется на несколько этапов: прием информации, контроль, интерполяция и согласование метеоэлементов. Данный процесс применяется в большинстве глобальных и региональных систем моделирования метеорологических данных. Процесс же усвоения данных представляет собой детальное восстановление состояния атмосферы для определенных регионов, что позволяет использовать метеорологические данные, не усваиваемые посредством объективного анализа в глобальных системах. Технология процесса усвоения предполагает использование в качестве корректируемых начальных данных результаты крупномасштабного анализа.

В качестве начальных крупномасштабных данных для моделирования в системе мезомасштабного прогнозирования на основе модели WRF в Белгидромете используются данные глобальной модели GFS (Global Forecast System) [7] в коде GRIB2 с шагом $0,25^\circ$ с дискретностью по времени 3 ч, заблаговременностью 48 ч, а в качестве данных для усвоения в системе используются данные, поступающие в базы данных Белгидромета наблюдения с наземных станций Республики Беларусь в коде KN-01 за 06 UTC, которые не поступают в Глобальную систему телесвязи (ГТС), а также наблюдения с других европейских наземных и аэрологических станций [8]. Усвоение дополнительных наземных и аэрологических данных является целесообразным, так как данные глобальной модели GFS не включают всю доступную метеорологическую информацию для региона Республики Беларусь, а только передаваемую в международный обмен. Кроме того, усвоение наблюдений проводится приближенно ко времени самих наблюдений, когда результаты глобального прогноза еще не доступны.

В результате анализа мирового опыта в качестве основы для создания системы усвоения данных наземных и аэрологических наблюдений был выбран модуль объективного анализа и контроля данных OBSGRID. С помощью данного модуля проводилось уточнение данных, по-

лучаемых прямыми методами, с помощью приборной базы (температуры, влажности, давления, скорости ветра) в модель [5].

Функциональные возможности модуля OBSGRID включают: выбор метода объективного анализа (схема Крессмана, мультиквадратический и др.); систему контроля и проверки данных на достоверность (валидацию); процедуры ввода фиктивных данных; расширенную сетку. Эта функция позволяет включать дополнительные данные вблизи границ расчетной области (домена), улучшая анализ. Для использования этой функции необходимо увеличить размер домена.

Модуль предоставляет несколько техник уточнения объективного анализа: 3 из 4 методов основаны на схеме Крессмана [2].

Суть подхода к усвоению данных в схеме Крессмана заключается во введении области влияния каждого вносимого наблюдения. В схеме каждое наблюдение имеет вес, который зависит от удаленности между точками с данными наблюдений и точкой сетки, а также от «радиуса влияния».

Данная схема задается равенствами:

$$x_j^a = x_j^b + \frac{\sum_{i=1}^p w_{ij}(y_i^o - x_i^b)}{\sum_{i=1}^p w_{ij}}, \quad (1)$$

где индекс j есть номер узла сетки; i – номер точки наблюдения; x^a – искомая оценка состояния; x^b – вектор начального приближения; y^o – значение наблюдения, которое задается функцией оператора поля значений и функцией ошибок (шумов); w_{ij} – весовая функция. Функция w_{ij} зависит от номера узла сетки j и номера точки наблюдения i ; она равна единице, если $i = j$, и является убывающей функцией расстояния d_{ij} между i -й и j -й точками, кроме того, $w_{ij} = 0$ при $d_{ij} > R$, где $R > 0$ – некоторая постоянная, или «радиус влияния» [2].

Весовая функция имеет квадратурную зависимость между «радиусом влияния» и функцией расстояния d_{ij} :

$$w_{ij} = \max\left(0, \frac{R^2 - d_{ij}^2}{R^2 + d_{ij}^2}\right), \quad (2)$$

Данная схема предполагает несколько циклов (итераций анализа) – данный метод называется методом последовательных поправок. Первые итерации в такой схеме дают приближение к наблюдениям в крупном масштабе, а последние – приближение к мелкомасштабным изменениям наблюдений. Методика усвоения данных основана на том, что в первом приближении в каждом узле сетки модели значения корректируются в соответствии с влиянием всех наблюдений. Метод Крессмана широко применяется для уточнения объективного анализа для численных моделей.

Технология усвоения приземных и аэрологических данных предполагает уточнение прогноза численной модели WRF, полученного за исходный срок 00 UTC, используя наблюдения за срок 06 UTC на территории Европы. Выбор данного срока наблюдений обусловлен наличием уже готовых результатов прогноза за исходный срок 00 UTC, что позволяет уточнить прогноз за исходный срок 00 UTC и получить его результаты раньше, чем новый прогноз за исходный срок 06 UTC.

В качестве метеорологической информации для системы OBSGRID за исходный срок 06 UTC использовались данные климатической базы данных Cliware Белгидромета:

- приземных метеорологических данных: давления на уровне моря и станции, температуры и точки росы на 2 м, скорости и направления ветра;
- данных аэрологических наблюдений: абсолютная высота изобарических поверхностей 1000, 850, 700, 500 гПа и др., температура, дефицит точки росы, скорость и направление ветра на соответствующих изобарических поверхностях.

Используемые для уточнения данные включают порядка 1700 станций наземного и аэрологического наблюдений на территории Европы и Республики Беларусь. Все выбранные метеорологические данные представляются в виде файлов специализированного формата LITTLE_R [9].

Далее производится повторный запуск расчета модели WRF, как за исходный срок 06 UTC, начальные данные которого прошли через систему усвоения. В результате получается прогноз с исходным сроком 06 UTC, ранее следующего прогноза глобальной модели с таким же исходным сроком.

Результаты верификации численных экспериментов. В целях оценки качества прогнозов, полученных с помощью разработанной автоматизированной системы усвоения наземных метеорологических и аэрологических данных наблюдений в мезомасштабную численную мо-

дель WRF (WRF-ARW), с сентября 2017 по май 2018 г. проводились вычислительные эксперименты. Оценка результатов проводилась в соответствии с методическим пособием по верификации мезомасштабного прогноза Белгидромета [10].

Для оценки прогнозов использовались два основных компонента системы статистической оценки численных прогнозов MET (Model Evaluation Tools): оценка по станциям (Point-stat) и оценка по полю (на сетке) прогноза (Grid-Stat) [10].

Для проведения станционной оценки с помощью компонента Point-Stat использовались результаты расчета модели WRF, содержащие прогностическую информацию в узлах сетки, и фактическая информация на станциях наблюдения [11]. Для оценки прогноза по полю также использовались результаты расчета модели WRF, содержащие прогностическую информацию в узлах сетки, и объективный анализ, соответствующий времени расчета модели прогноза. Система MET позволяет проводить оценку для непрерывных и категориальных переменных [3].

Для детального анализа успешности прогнозов все результаты оценок сохранялись в базе данных. Оценка проводилась для следующих метеорологических величин: прогноз приземной температуры, приземного давления, температур и высоты барических поверхностей (500, 700, 850 гПа) и полусуточных осадков по модели WRF.

Оценка проводилась по основным статистическим показателям. Для непрерывных переменных: ME – средняя арифметическая (систематическая) ошибка прогноза; MAE – средняя абсолютная ошибка прогноза; MSE – средняя квадратическая ошибка прогноза; R – коэффициент корреляции Пирсона; MAE_O – фактическая изменчивость; MAE_F – прогностическая изменчивость. Для категориальных переменных: PC (доля правильных прогнозов) – при точном прогнозе равна 100%; SR (коэффициент успешности) – при точном прогнозе равен 100%; U (оправдываемость прогноза факта отсутствия явления) – при точном прогнозе равна 100%; POD (предупрежденность факта наличия события) – при точном прогнозе равна 100%; PODN (предупрежденность факта отсутствия события) – при точном прогнозе равна 100%; FBIAS (смещение частоты) – при точном прогнозе равно 1, если меньше 1 – событие недостаточно спрогнозировано; FAR (коэффициент ложных тревог) – при точном прогнозе равен 0; POFD (вероятность ложного обнаружения) – при точном прогнозе равен 0; TS (оценка угрозы) – при точном прогнозе равна 1; ETS (объективная оценка угрозы) – для точного прогноза равна 1; HK (показатель Хансена и Куиперса, или критерий Пирси–Обухова) – способность прогноза к выявлению различий между случаями с событиями и без событий – при точном прогнозе равен 1; H (критерий Багрова, или показатель Хейдке) – при H = 1 все прогнозы оправдались, при H = 0 прогнозы на уровне случайных, при H = -1 все прогнозы ошибочны; OR (вероятность успешного исхода) – при точном прогнозе равна [12].

Для оценки эффективности разработанной системы усвоения и влияния усвоенных данных проводился сравнительный анализ оценки прогнозов без усвоения дополнительных данных (оригинал) и с усвоением приземных и аэрологических данных (эксперимент).

Сравнительная оценка работы системы проводилась с сентября 2017 г. по май 2018 г., что позволило включить в оценку различные периоды года.

В табл. 1 и 2 представлены оценки прогноза приземного барического поля и прогноза высоты изобарической поверхности 700 гПа (H700) соответственно. Оценки дают основание говорить об улучшении прогноза. Средняя вероятность ошибок эксперимента меньше, чем у оригинала: средняя вероятность ошибок уменьшилась на 5% для случаев >3 гПа для приземного давления и на 4% для 2–4 дам для изобарической поверхности 700 гПа. Кроме того, среднеквадратическая ошибка прогноза приземного давления уменьшилась на 0,28 гПа [9].

Таблица 1. Оценка прогноза приземного давления для заблаговременности 24 ч

| Конфигурация | Шаг, км | Средняя вероятность ошибок, % | | | ME | MAE | RMSE | R |
|--------------|---------|-------------------------------|-----------|--------|-------|------|------|------|
| | | 0–1,5 гПа | 1,5–3 гПа | >3 дам | | | | |
| Оригинал | 15 | 72 | 20 | 8 | -0,83 | 1,27 | 1,79 | 0,93 |
| Эксперимент | 15 | 78 | 19 | 3 | -0,62 | 1,09 | 1,51 | 0,93 |

Таблица 2. Оценка прогноза H700 для заблаговременности 24 ч

| Конфигурация | Шаг, км | Средняя вероятность ошибок, % | | | ME | MAE | RMSE | R |
|--------------|---------|-------------------------------|---------|--------|-------|------|------|------|
| | | 0–2 дам | 2–4 дам | >4 дам | | | | |
| Оригинал | 15 | 95 | 5 | 0 | -0,14 | 0,7 | 0,99 | 0,98 |
| Эксперимент | 15 | 99 | 1 | 0 | 0 | 0,57 | 0,78 | 0,98 |

Анализ прогноза температуры на изобарических высотах 500, 700, 850 гПа показывает незначительные улучшения абсолютной ошибки прогноза, других статистических показателей. К примеру, средняя абсолютная ошибка прогноза (MAE) для изобарической поверхности 500 гПа уменьшилась на $0,03^{\circ}$, но среднеквадратическая ошибка (RMSE) изменилась незначительно (табл. 3).

Таблица 3. Оценка прогноза температуры T500 для заблаговременности 24 ч

| Конфигурация | Шаг, км | Средняя частота ошибок, % | | | ME | MAE | RMSE | R |
|--------------|---------|---------------------------|------|-----|------|------|------|-----|
| | | 0-2° | 2-4° | >4° | | | | |
| Оригинал | 15 | 99 | 1 | 0 | 0,22 | 0,51 | 0,73 | 0,9 |
| Эксперимент | 15 | 100 | 0 | 0 | 0,16 | 0,48 | 0,69 | 0,9 |

В свою очередь прогноз приземной температуры дал незначительное улучшение средней частоты ошибок в пределах 2–4° на 4%.

Анализ прогноза полусуточных осадков проводился также за период сентябрь 2017 – май 2018 г., что дало возможность захватить несколько различных по характеру осадков сезонов. В основе оценки прогноза осадков лежит расчет статистических показателей для категориальных переменных описанных выше. Расчет для таких переменных производится на основании таблицы сопряженности, учитывающей количество оправдавшихся и неоправдавшихся прогнозов наличия и отсутствия явления [8].

Оценка прогноза осадков проводилась для метеорологических станций на территории Республики Беларусь. В табл. 4 приведены показатели успешности прогноза осадков для указанного периода по станциям.

Таблица 4. Показатели успешности прогноза осадков по станциям на 24 UTC за период (сентябрь 2017 – май 2018)

| Показатель | Оригинал | Эксперимент |
|------------|----------|-------------|
| PC, % | 76 | 77 |
| SR, % | 63 | 63 |
| U, % | 91 | 91 |
| POD, % | 89 | 88 |
| PODN, % | 69 | 70 |
| FBIAS | 1,41 | 1,4 |
| FAR, % | 37 | 37 |
| POFD, % | 31 | 30 |
| TS | 0,59 | 0,58 |
| ETS | 0,36 | 0,37 |
| HK | 0,58 | 0,58 |
| H | 0,53 | 0,54 |
| OR | 17,79 | 17,18 |

Проанализировав статистические показатели прогноза осадков, можно говорить об улучшении качества прогноза за счет увеличения количества правильных прогнозов (PC), увеличения предупрежденности отсутствия явления (PODN). Анализ показывает, что улучшение прогноза осадков для усовершенствованной системы проявляется в более точном прогнозе отсутствия явления.

Стоит отметить, что наибольшее влияние усвоения наземных и аэрологических наблюдений оказало на ранние часы прогноза (12 UTC), что связано с технологией усвоения. Чем дальше прогноз от срока усвоения, тем меньше заметно влияние дополнительных наблюдений. Кроме того, наиболее явно положительное влияние проявляется на прогнозе барического поля и осадков, а при анализе оценки прогноза приземной температуры оно слабо заметно.

Таким образом, анализ статистических показателей оценки качества прогноза температуры, барического поля и осадков, смоделированных с помощью системы мезомасштабного прогноза WRF с усвоенными наземными и аэрологическими наблюдениями, дает возможность говорить о положительном влиянии дополнительных усвоенных данных на результат прогноза.

Заключение. В 2017 г. в Белгидромете Республики Беларусь в рамках выполнения научно-исследовательской работы «Разработка базовых элементов технологии мезопрогнозирования элементов погоды по территории Республики Беларусь на основе усвоения данных в численной модели WRF» была успешно разработана система усвоения наземных метеорологических

и аэрологических данных наблюдений. Система была внедрена в мезомасштабную численную модель WRF (WRF-ARW), используемую в оперативных подразделениях Белгидромета.

Основными компонентами разработанной системы являются: автоматизированная система контроля, подготовки и хранения данных метеорологических наблюдений в специализированном формате LITTLE_R; автоматизированная система контроля и объективного анализа, позволяющая произвести усвоение наблюдений в численную мезомасштабную модель на основе метода полиномиальной аппроксимации (метод Крессмана); комплекс мезомасштабного численного прогнозирования на основе модели WRF, включающую счет мезомасштабной модели WRF с блоком усвоения данных за срок 06 UTC, постобработку результатов прогноза.

Кроме того, дополнительно для анализа результатов моделирования в системе применяется комплекс программ статистической оценки и визуализации результатов прогноза с усвоенными метеорологическими параметрами.

Разработанная система усвоения позволила уточнить прогнозы численной модели WRF за исходный срок 00 UTC за счет усвоения дополнительных наземных и аэрологических наблюдений за срок прогноза 06 UTC. Для уточнения исходного поля для моделирования использовалось порядка 1500 синоптических и 10 аэрологических станций наблюдения на территории Европы.

Анализ статистических показателей за период сентябрь 2017 – май 2018 г. свидетельствует об улучшении качества прогноза барического поля и поля осадков на ранних сроках моделирования, а также незначительном положительном влиянии на поле приземной температуры. Наибольший положительный эффект выражен в оценке прогноза осадков: усвоение дополнительных данных позволило повысить точность прогноза отсутствия осадков, а следовательно, уменьшить количество ложных прогнозов. Стоит отметить, что оценка представлена за достаточно большой период, что дает представление о влиянии усвоенных данных на прогноз в различных синоптических условиях. При анализе отдельных случаев сильных осадков разница в оценках выглядит более значительно.

Список использованных источников

1. 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. – 125 p.
2. Objective Analysis (OBSGRID). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/users_guide_chap7.htm
3. Определение набора параметров верификации рабочей версии программно-методического комплекса мезо-прогнозирования атмосферных процессов: отчёт о НИР (промежут.) / отв. исполнитель И. А. Деменцова. – Минск: Респ. гидрометеорол. центр, 2014. – 48 с. – Инв. № 3802.
4. Глобальная система усвоения данных наблюдений о состоянии атмосферы / А. В.Фролов [и др.]. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2000. – 187 с.
5. Новая технология объективного анализа на основе схемы 3D-VAR / М. Д. Цырульников [и др.] // Информационный сб. № 39 Росгидромета: Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – М., 2012. – С. 6–14.
6. Система анализа состояния атмосферы в Сибирском регионе с использованием модели WRF-ARW и трехмерного вариационного усвоения данных WRF 3D-Var / Р. Б. Зарипов [и др.] // Метеорология и гидрология. – 2016. – № 12. – С. 33–43.
7. Global Forecast System (GFS). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>.
8. Разработка базовых элементов технологии мезо-прогнозирования элементов погоды по территории Республики Беларусь на основе усвоения данных в численной модели WRF: отчёт о НИР (промежут.) / отв. исполнитель Р. Н. Бурак. – Минск: Белгидромет, 2017. – 53 с. – Инв. № 4087.
9. Разработка базовых элементов технологии мезо-прогнозирования элементов погоды по территории Республики Беларусь на основе усвоения данных в численной модели WRF: отчёт о НИР (промежут.) / отв. исполнитель Р. Н. Бурак. – Минск: Белгидромет, 2017. – 40 с. – Инв. № 4086.
10. Определение набора параметров верификации рабочей версии программно-методического комплекса мезо-прогнозирования атмосферных процессов: отчёт о НИР (промежут.) / отв. исполнитель И. А. Деменцова. – Минск: Респ. гидрометеорол. центр, 2013. – 46 с. – Инв. № 3798.
11. Model Evaluation Tools Version 4.1. User's Guide. – Developmental Testbed Center, Boulder, Colorado, USA, March 2009. – 226 p.
12. Joint Working Group on Verification. Recommendations for the Verification and Intercomparison of QPFs and PQPFs from Operational NWP Models. – WMO TD No. 1485, WMO WWRP 2009-1. – 37 p.

Поступила 14.06.2018