

## ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПОВЫШЕНИЯ ОПРАВДЫВАЕМОСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ И ОБЪЕКТИВНОГО АНАЛИЗА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

С. А. Лысенко, П. О. Зайко

*Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

**Аннотация.** В статье представлена комплексная геоинформационная система повышения оправдываемости гидродинамического прогноза погоды, включающая актуализированные и оперативно обновляемые на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) пространственные распределения физических параметров подстилающей поверхности, адаптированные для территории Беларуси наборы параметризаций атмосферных процессов подсеточного масштаба и блоки усвоения данных наземных метеорологических, аэрологических и радиолокационных наблюдений. Показано, что усвоение данных метеорологических и аэрологических станций позволяет уменьшить вероятность абсолютных ошибок прогноза приземного давления  $\geq 3$  ГПа на 5 %. Усвоение радиолокационных данных сокращает среднеквадратическую ошибку прогноза скорости приземного ветра на 0,33–0,74 м/с при заблаговременности в пределах 24 ч и позволяет более точно спрогнозировать территориальное распределение конвективных систем и области выпадения осадков на ранних часах прогноза (до 12 ч). Уточнение структуры землепользования и параметров подстилающей поверхности на основе оперативных спутниковых данных обеспечивает повышение оправдываемости краткосрочного гидродинамического прогноза приземной температуры воздуха на территории Беларуси на 4–9 % с максимальным проявлением в Минской, Гомельской и Гродненской областях в холодный период года.

**Ключевые слова:** численный прогноз погоды; гидродинамическое моделирование; WRF; параметризация атмосферных процессов; усвоение данных; доплеровский метеорологический радиолокатор; дистанционное зондирование Земли.

**Для цитирования.** Лысенко С. А., Зайко П. О. Геоинформационная система повышения оправдываемости гидродинамического прогноза погоды для территории Беларуси на основе данных дистанционного зондирования Земли и объективного анализа метеорологических полей // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 30–40.

## GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM FOR HYDRODYNAMIC WEATHER FORECAST ACCURACY INCREASING FOR BELARUSIAN TERRITORY BASED ON EARTH REMOTE SENSING DATA AND THE OBJECTIVE ANALYSIS OF METEOROLOGICAL FIELDS

S. A. Lysenko, P. O. Zaiko

*Institute of Nature Management of National Academy of Science of Belarus, Minsk, Belarus*

**Abstract.** The article presents a complex geoinformation system for the validity of hydrodynamic weather forecasts improving, including updated and promptly updated on the basis of the remote sensing data spatial distributions of the physical parameters of the underlying surface, the sets of the parameterizations of atmospheric processes at the grid scale and blocks of the data assimilation from ground-based meteorological, aerological and radar observations adapted for the territory of Belarus. It is shown that the data assimilation of meteorological and aerological stations allows reducing the probability of absolute errors in surface pressure forecast  $\geq 3$  hPa by 5 %. The assimilation of radar data reduces the mean-square error of surface wind speed forecast by 0.33–0.74 m/s at an advance time within 24 h, and allows more accurate forecasting of the territorial distribution of convective systems and precipitation areas at early hours of the forecast (up to 12 h). The clarification of the land use structure and underlying surface parameters on the base of operational satellite data provides an increase in the validity of the short-term hydrodynamic forecast of surface air temperature in Belarus by 4–9 % with maximum manifestation in Minsk, Gomel and Grodno regions in the cold period of a year.

**Keywords:** numerical weather forecasting; hydrodynamic modeling; WRF; parameterization of atmospheric processes; data assimilation; doppler weather radar; Earth remote sensing.

**For citation.** Lysenko S. A., Zaiko P. O. Geographic information system for hydrodynamic weather forecast accuracy increasing for Belarusian territory based on Earth remote sensing data and the objective analysis of meteorological fields. *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 30–40.

**Введение.** Развитие современной вычислительной техники, технологий больших данных и облачных вычислений сделали задачу мезомасштабного численного моделирования погоды доступной широкому кругу специалистов. Применение современных численных методов решения уравнений гидротермодинамики атмосферы, нерегулярных вычислительных сеток и эффективных параметризаций атмосферных процессов подсеточного масштаба позволили достичь существенного прогресса в увеличении заблаговременности численных прогнозов погоды. Расширение глобальной системы наземных и спутниковых метеорологических наблюдений, наряду с развитием технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и алгоритмов объективного анализа метеорологических полей, сделали возможным более точное и детальное описание начального состояния атмосферы, что положительно отразилось на оправдываемости краткосрочных прогнозов погоды.

Мировой опыт использования мезомасштабных численных моделей для ежедневного прогноза погоды позволил выработать некоторые общие рекомендации по ассимиляции в них данных спутниковых и наземных средств метеорологических наблюдений, выдвинуть требования к пространственному и временному разрешению моделей при прогнозировании ими неблагоприятных и опасных явлений погоды, оценить потенциальную точность краткосрочных прогнозов различных метеорологических элементов. В то же время конкретные рекомендации по конфигурации гидродинамической модели, используемым в ней параметризациям физических процессов подсеточного масштаба и алгоритмам усвоения данных, как правило, ограничиваются конкретными регионами и отдельными синоптическими ситуациями. При этом успешный опыт применения модели для определенного региона или синоптической ситуации не гарантирует успешность ее прогнозов в других регионах мира, имеющих свои климатические и ландшафтно-геофизические особенности.

Для составления прогноза состояния атмосферы с помощью численных моделей требуется предварительная оценка значений метеорологических величин в узлах расчетной сетки в начальный момент времени или в некотором начальном интервале. Такие значения получают в результате специальной процедуры усвоения моделью данных, называемой *численным анализом метеорологических полей* [1]. Наиболее распространенными методами численного анализа являются оптимальная интерполяция, трехмерная и четырехмерная вариационная ассимиляция данных, фильтр Кальмана и его ансамблевый аналог [2, 3]. Данные методы могут эффективно применяться для учета дополнительных наземных, аэрологических, радиолокационных и спутниковых данных. От качества и полноты данных о начальном состоянии атмосферы зависит точность и заблаговременность численного прогноза погоды.

В настоящей работе представлена адаптированная для территории Беларуси система численного прогноза погоды на базе мезомасштабной гидродинамической модели WRF (Weather Research and Forecasting), а также описаны основные этапы ее создания – от выбора схем параметризаций атмосферных процессов подсеточного масштаба до оценок оправдываемости численных прогнозов метеорологических полей. Отдельно рассмотрены вопросы влияния цифровой модели подстилающей поверхности и усвоения различных типов метеорологических данных на качество краткосрочного численного прогноза погоды в различные сезоны года.

В качестве основного источника информации для системы усвоения метеорологических данных в модели WRF использованы наблюдения новых автоматизированных метеорологических станций Беларуси и трех доплеровских метеорологических радиолокаторов (ДМРЛ) (в аэропортах городов Минска, Гомеля и Витебска), а также аэрологические наблюдения в городе Минске. Данные пункты наблюдений были введены в эксплуатацию в 2016–2020 гг. в рамках мероприятия по развитию гидрометеорологической сети Республики Беларусь государственной программы «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов». Учет этих данных позволил детализировать объективную информацию о текущем состоянии атмосферы и создал предпосылки для дальнейшего повышения точности численных прогнозов погоды для территории Беларуси.

**Геоинформационная система повышения оправдываемости численного прогноза погоды.** С 2016 по 2023 г. в информационную среду Белгидромета Республики Беларусь последовательно внедряли компоненты геоинформационной системы повышения оправдываемости численного прогноза погоды, включающей регионально-адаптированную мезомасштабную модель WRF с оптимальным набором схем параметризаций атмосферных процессов подсеточного масштаба, компонент усвоения данных наземных и аэрологических наблюдений, компонент усвоения данных ДМРЛ и компонент усвоения данных ДДЗ.

С целью отработки конфигурации модели и оценки успешности ее прогнозов провели четыре комплексных эксперимента по численному моделированию погодных условий на территории Беларуси, включающих прогнозирование неблагоприятных и опасных явлений погоды в различные сезоны года с различным набором схем параметризаций физических процессов (пограничный слой, конвекция, микрофизика и др.) (более 1320 случаев); прогноз метеорологических полей с усвоением дополнительных наземных и аэрологических наблюдений по территории Беларуси и Европы (более 965 случаев);

прогноз с усвоением данных ДМРЛ по территории Беларуси (40 случаев); численный прогноз метеорологических полей с различными подходами к инициализации физических параметров подстилающей поверхности в адаптированной для территории Беларуси модели WRF (150 случаев).

Численные эксперименты выполняли на базе модели WRF–ARW версий 3.7–4.3 в двух расчетных областях: внешняя (материнская) область, охватывающая всю территорию Европы с пространственным разрешением 15 км – (250 × 240) узлов, и вложенная область, покрывающая прогнозом территорию Восточной Европы с разрешением 3 км – (586 × 586) узлов. В качестве начальных и граничных условий использовали прогнозы глобальной модели GFS с пространственным разрешением 0,25° и шагом интегрирования по времени для внешней и вложенной областей 90 и 18 сек соответственно. Расчет по вертикали осуществляли на 33 уровнях до 5 гПа, заблаговременность прогноза составила +48 ч с дискретностью 1 ч.

На первом этапе создания геоинформационной системы проводили анализ влияния различных схем параметризаций атмосферных процессов подсеточного масштаба (конвекция, микрофизика, пограничный слой атмосферы и т. д.) на прогноз опасных и неблагоприятных явлений погоды [4]. Были исследованы временные и пространственные особенности распределения ошибок прогноза метеорологических полей (приземной температуры воздуха на 2 м, давления на уровне моря, количества осадков) за четырехлетний период (2014, 2017, 2018 и 2021 г.). Численные прогнозы приземных метеорологических полей сравнивали с фактическими наблюдениями на метеорологических станциях, на основании чего выработали рекомендации по выбору наиболее успешного набора параметризаций для территории Беларуси.

В разработанном компоненте системы усвоения наземных и аэрологических наблюдений применяли метод Крессмана [5], суть которого заключается в задании области влияния каждого вносимого наблюдения на исходное метеорологическое поле. Вес отдельного наблюдения зависит от удаленности пункта наблюдений от узла модельной сетки и от радиуса его влияния. Реализованная в Белгидромете Республики Беларусь технология усвоения приземных и аэрологических наблюдений предполагала уточнение прогноза численной модели WRF за исходный срок 00 UTC за счет усвоения дополнительных наблюдений за срок 06 UTC [6].

В качестве исходных данных для усвоения использовали наблюдения наземных метеорологических (~1650 шт.) и аэрологических (~18 шт.) станций, расположенных на всей территории Европы, в том числе 52 метеорологических и 3 аэрологических станций Беларуси. В число белорусских станций, использованных для усвоения, были включены наблюдения, которые не поступают в глобальную систему телесвязи, но хранятся и доступны в климатических базах данных метеорологических наблюдений Белгидромета Республики Беларусь. Для каждой наземной станции усваивались давление на уровне моря и станции, температура воздуха и точка росы на высоте 2 м, скорость и направление ветра на 10 м; из аэрологических наблюдений в модели усваивались абсолютная высота изобарических поверхностей (1000, 850, 700, 500 гПа и др.), температура воздуха, дефицит точки росы, а также скорость и направление ветра на указанных изобарических поверхностях.

Следующий компонент геоинформационной системы включал блоки контроля, подготовки и усвоения данных горизонтальной отражаемости и радиальной скорости ветра с трех ДМРЛ («Минск-2», «Витебск», «Гомель»). Оценку его эффективности проводили на прогнозе 40 синоптических ситуаций с неблагоприятными и опасными явлениями погоды, наблюдавшимися на территории Беларуси в 2017–2020 гг.

В качестве основного метода контроля качества данных ДМРЛ использовали адаптированный двухуровневый метод удаления радиолокационных помех на основе фильтра Габелла [7]. В данном методе производится удаление помех от местных объектов (рельефа, зданий и др.), имеющих значительную пространственную неоднородность и изменчивость распределения сигнала. Второй метод предполагал контроль данных ДМРЛ на основе фильтра нечеткой логики для поляризационных характеристик (fuzzy echo classification) [8].

Основным методом усвоения данных ДМРЛ выбрали метод трехмерного вариационного усвоения (3D-VAR), суть которого заключается в минимизации квадратичного функционала с учетом ковариации фоновой ошибки прогноза и ковариации ошибки наблюдения [9]. Наблюдаемые горизонтальная отражаемость и радиальная скорость усваивались в мезомасштабную численную модель WRF через параметры содержания дождевой воды и водяного пара. Фоновые ошибки прогноза модели WRF описывали ковариационной матрицей, полученной по методу [10].

Результаты всех численных экспериментов по прогнозированию погодных условий с помощью адаптированной модели WRF проходили статистическую оценку с расчетом систематической и средней абсолютной ошибок, среднеквадратической погрешности и коэффициента корреляции Пирсона. Оценивали качество численного прогноза температуры воздуха на 2 м, давления на уровне моря, суточного количества осадков, высоты изобарических поверхностей 500, 700, 850 гПа и температуры

воздуха на них. В экспериментах с усвоением данных ДМРЛ также оценивали качество численного прогноза скорости ветра. Отдельно проводили расчет показателей оправдываемости численного прогноза приземной температуры и количества осадков по ТКП [11].

Для оценки качества прогноза осадков с усвоением радиолокационных данных рассчитывали таблицу сопряженности (доля правильных прогнозов, предупрежденность факта наличия и отсутствия события, коэффициент ложных тревог и другие характеристики). Успешность прогноза пространственного распределения зон осадков, включая их удаленность и форму, оценивали с применением объектно-ориентированного подхода «MODE» [12].

В компоненте усвоения данных ДЗЗ реализовано два подхода к инициализации параметров цифровой модели подстилающей поверхности (тип землепользования, альбедо, индекс листовой поверхности, доля поглощенной фотосинтетически активной радиации и др.) [13]. Первый – статический подход (STATIC) – предполагает для задания параметров подстилающей поверхности использовать базу данных спутниковых наблюдений GLASS (The Global Land Surface Satellite). На ее основе были рассчитаны среднемесячные геопространственные распределения сферического альбедо (включая альбедо снега и оголенной почвы в холодный период года), индекса листовой поверхности LAI, доли фотосинтетически активной радиации FAPAR за период 2000–2020 гг. [14]. Второй – динамический подход (DYNAMIC) – основан на использовании для инициализации параметров цифровой модели подстилающей поверхности ежедневно обновляемых данных спутникового спектрорадиометра MODIS [15].

Для описания в модели структуры землепользования использовали информацию на основе данных спутникового сканера высокого спектрального разрешения PROBA-V Европейского Космического Агентства, представленную в базе данных Land Cover 2019 (GLC2019) [16].

**Результаты и их обсуждение.** Влияние каждого из описанных компонентов геоинформационной системы на качество краткосрочного прогноза погоды проводили отдельно, по мере их внедрения в информационную среду Белгидромета Республики Беларусь и расширения числа спрогнозированных случаев.

На первом этапе проводили анализ эффективности использования различных схем параметризаций физических процессов подсеточного масштаба в модели WRF. Это позволило выявить некоторые общие особенности пространственно-временного распределения ошибок прогноза метеорологических величин на территории Беларуси для холодного и теплого сезонов года.

Для холодного периода года, когда часто наблюдаются такие неблагоприятные явления, как гололед, ливневый снег и туман, наиболее успешными оказались прогнозы с применением параметризации Миллбрандта – Яу для микрофизики облаков, университета Ёнсей – для турбулентности пограничного слоя и Каина – Фритша – для конвективных процессов подсеточного масштаба [17–19]. Для летнего сезона, в котором велика вероятность развития таких неблагоприятных и опасных явлений погоды, как грозы, град, ливневые осадки и шквалы, наименьшие ошибки численного прогноза метеозадаваемых по территории Беларуси достигались с применением тех же параметризаций микрофизики облаков и пограничного слоя, что и для холодного периода года. Однако среди схем параметризаций конвективных процессов наиболее успешной оказалась схема Грелл-3D, лучше других учитывающая мелко-масштабную конвекцию. Указанный набор схем параметризаций проявил себя успешнее остальных на всех исследуемых изобарических уровнях.

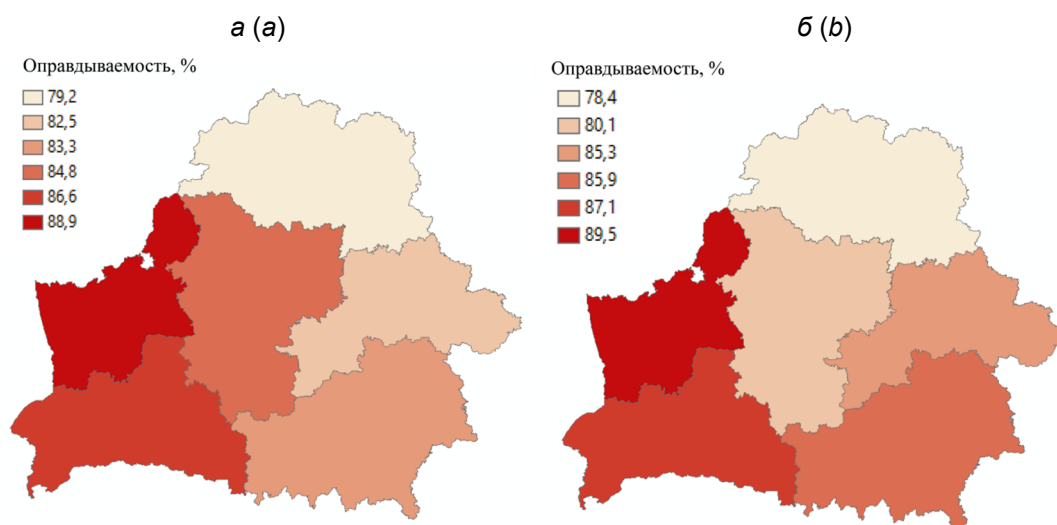
В прогнозах температуры на 2 м наименьшие ошибки наблюдались при использовании параметризации пограничного слоя атмосферы QNSE: для заблаговременности +48 ч среднеквадратическая ошибка прогноза приземной температуры составила 2,5 °C, тогда как при использовании схемы университета Ёнсей – 2,57 °C. В прогнозе осадков в холодный период года указанные выше параметризации позволили повысить общую оправдываемость численного прогноза наличия осадков на 2 % (PC – 77 %), а прогноза их отсутствия – на 8 % (PODN – 75 %); увеличился процент предупрежденности факта отсутствия осадков и, как следствие, количество ложных тревог в прогнозе осадков – на 5 % (FAR – 46 %). Для летнего периода среднеквадратическая ошибка прогноза приземной температуры с применением рекомендуемых параметризаций составила для дневного (+12 ч) и ночного (+24 ч) сроков 1,76 °C и 1,83 °C соответственно, что соотносится с уровнем точности других численных моделей, используемых в мировой практике [20].

Дополнительно проводили сравнение качества численного прогноза осадков при различном пространственном разрешении области гидродинамического моделирования (15 и 3 км), так как параметризация конвекции на шаге <5 км не требуется. С увеличением пространственного разрешения общая оправдываемость прогноза осадков в летний период повышается на 5 % (до 84 %), также наблюдается сокращение показателя ложных тревог на 10 % (до 41 %). В целом для летнего периода оправдываемость прогноза осадков была выше, чем для зимнего. Для заблаговременности +24 ч предупрежденность факта отсутствия осадков составила 88 %. Полученные результаты позволяют говорить о том, что численное моделирование процессов летней конвекции напрямую (без параметризации) улучшает

показатели оправдываемости прогноза количества осадков для теплого периода года. При этом как для теплого, так и для холодного периода года наблюдается переоценка в прогнозах фактов наличия осадков.

Результаты объектно-ориентированных оценок прогнозов WRF для территории Беларуси говорят о достаточно точном воспроизведении моделью структуры и центров облачных систем. Показатель критического успеха для 25 случаев выпадения осадков (дождь, град) составил 0,56 (CSI). При этом модель в целом переоценивает площадь сильных осадков.

Оценки распределения ошибок численного прогноза метеозлементов по областям Беларуси за 2017, 2018 и 2021 г. показали, что наиболее успешными являются прогнозы температуры воздуха на 2 м для Гродненской и Брестской областей, наименее успешными – для Могилёвской и Витебской областей (рис. 1). Средняя оправдываемость прогноза приземной температуры по 36 оцениваемым месяцам при заблаговременности +24 ч составила 89,2 % для Гродненской области и 86,8 % для Брестской области, при заблаговременности +36 ч – 88,8 и 86,4 % соответственно.



**Рис. 1. Карта распределения средней оправдываемости численного прогноза приземной температуры по модели WRF по областям Беларуси с заблаговременностью +24 ч. Область расчета модели: а – 15 км; б – 3 км**

**Fig. 1. Map of the distribution of the average accuracy of the numerical forecast of surface temperature using the WRF model by region of Belarus with a lead time of +24 hours. Model calculation area: а – 15 km; б – 3 km**

В прогнозе осадков на текущую ночь (+24 ч) наиболее высокая оправдываемость была отмечена для Витебской (90,1 %) и Могилёвской (87,3 %) областей, самая низкая оправдываемость – для Минской и Брестской областей (рис. 2). Подобное пространственное распределение ошибок прогнозов численной модели WRF может быть обусловлено как особенностями распределения среднемесячных климатических характеристик по территории страны, так и различной плотностью метеорологических станций у западных и восточных границ Беларуси.

В прогнозе на следующий день (+36 ч) наилучшее качество прогноза осадков отмечалось для Гомельской (87 %), Минской (85,7 %) и Брестской (84,3 %) областей, самая низкая оправдываемость прогнозов характерна для Могилёвской области (80,1 %).

Второй этап исследования включал серию численных экспериментов по моделированию погодных условий на территории Беларуси и Европы с усвоением в модели WRF региональных наземных и аэрологических наблюдений. Из данных наземных метеорологических станций в модель усваивались давление на уровне моря и станции, температура воздуха и точка росы на 2 м, скорость и направление ветра. Усваиваемые аэрологические данные включали абсолютные высоты стандартных изобарических поверхностей и соответствующие им значения температуры воздуха, дефицита точки росы, скорости и направления ветра на соответствующих уровнях.

Результаты эпигнозного численного моделирования погоды на территории Беларуси за 2017–2020 гг. показывают, что усвоение данных метеостанций оказывает наиболее ошутимое влияние на точность прогноза поля давления. Так, средняя вероятность ошибок прогноза приземного давления в диапазоне более 3 гПа уменьшилась на 5 %, а для изобарической поверхности 700 гПа ошибки в диапазоне 2–4 гПа сократились на 4 %.

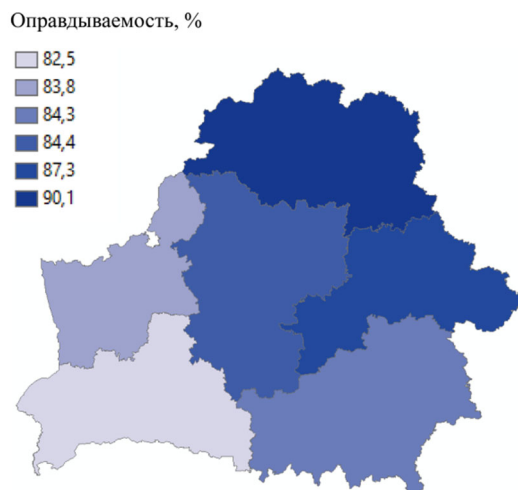


Рис. 2. Карта распределения средней оправдываемости численного прогноза осадков модели WRF по областям Беларуси с заблаговременностью +24 ч. Область расчета модели – 3 км

Fig. 2. Map of the distribution of the average accuracy of the numerical precipitation forecast of the WRF model by regions of Belarus with a lead time of +24 hours. Model calculation area – 3 km

Влияние усвоения метеоданных на качество прогноза температуры воздуха также положительно, однако менее заметно, чем для поля давления. Средняя вероятность ошибок прогноза температуры на 2 м в диапазоне 2–4 °С уменьшается на 4 %, однако абсолютные значения этого сокращения незначительны (рис. 3).

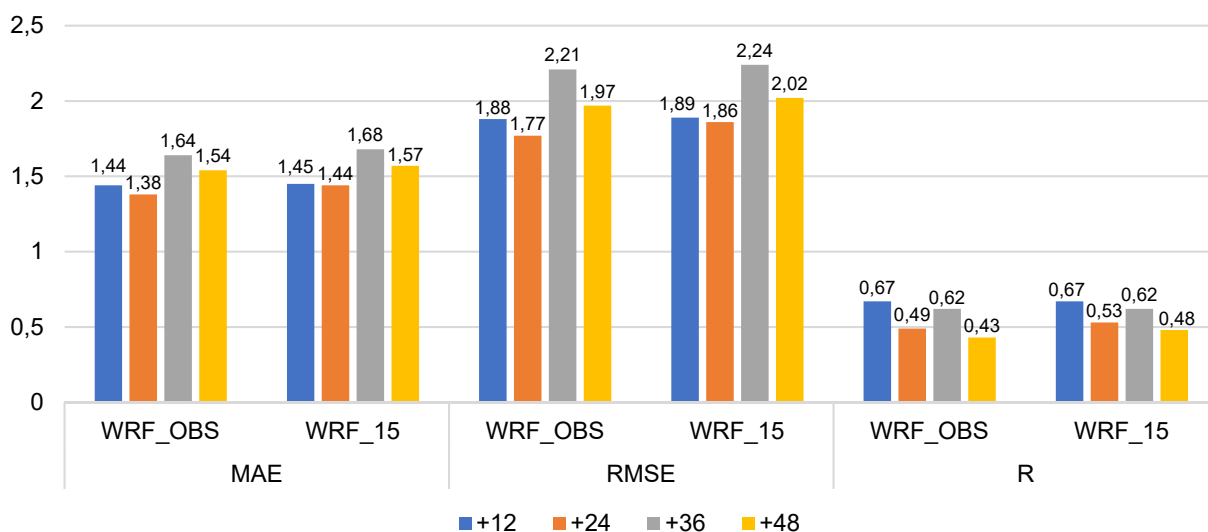


Рис. 3. Диаграммы метрик качества прогноза приземной температуры на 2 м по модели WRF с усвоением (WRF\_OBS) и без усвоения (WRF\_15) данных наземных и аэрологических наблюдений, 2019–2020 гг.: MAE – средняя абсолютная ошибка; RMSE – корень среднеквадратической ошибки; R – коэффициент корреляции

Fig. 3. Diagrams of quality metrics for the forecast of surface temperature at 2 m using the WRF model with assimilation (WRF\_OBS) and without assimilation (WRF\_15) of ground-based and aerological observation data, 2019–2020: MAE – average absolute error; RMSE – root of the standard error; R – correlation coefficient

В сравнении с базовым прогнозом численной модели WRF экспериментальный вариант прогноза с усвоением в ней данных наблюдений показал повышение показателей успешности прогноза осадков (см. таблицу), которое достигается главным образом за счет более точного прогноза факта их отсутствия.

## Показатели успешности численного прогноза осадков по станциям, 2020 г., %

## Success rates of numerical precipitation forecast by station, 2020, %

Сценарий	ORIG	WRF_OBS	ORIG	WRF_OBS	ORIG	WRF_OBS
	+12		+24		+36	
PC	71	76	75	79	70	73
SR	52	58	51	62	51	56
U	96	95	91	90	94	93
POD	94	92	79	80	92	90
PODN	62	68	74	79	60	65
FAR	48	42	49	38	49	44

Примечание: PC – доля правильных прогнозов; SR – коэффициент успешности; U – оправдываемость прогноза факта отсутствия явления; POD – предупрежденность факта наличия события; PODN – предупрежденность факта отсутствия события; FAR – коэффициент ложных тревог.

Note: PC – proportion of correct predictions; SR – success rate; U – justification for predicting the absence of a phenomenon; POD – warning of the fact of the event; PODN – warning of the absence of an event; FAR – false alarm coefficient.

Третья серия численных экспериментов включала моделирование 40 случаев с неблагоприятными и опасными явлениями погоды на территории Беларуси за 2017–2020 гг. с усвоением данных радиолокационной отражаемости и радиальной скорости ветра с трех ДМРЛ Беларуси. Радиолокационные данные перед их усвоением в мезомасштабной модели подвергали предварительной обработке, включающей детектирование и классификацию радиолокационных помех на основе фильтра Габелла и алгоритмов нечетной логики [8, 21].

Наиболее существенное положительное влияние усвоение радиолокационных данных оказало на качество численного прогноза скорости приземного ветра: для заблаговременности +6 ч ее среднеквадратическая ошибка уменьшилась на 0,33 м/с; для заблаговременности +12 ч – на 0,74; для заблаговременности +18 ч – на 0,45; для заблаговременности +24 ч – на 0,17 м/с. К 24-му часу прогноза влияние ассимиляции данных стало несущественным. Во всех численных экспериментах (как с усвоением, так и без усвоения радиолокационных данных) наблюдалось систематическое завышение моделью WRF скорости ветра на 10 м при значении коэффициента корреляции в пределах от 0,54 до 0,68.

В численных экспериментах с усвоением данных ДМРЛ отмечается увеличение точных прогнозов атмосферных осадков на 2 % для заблаговременности +12 ч и повышение предупрежденности факта наличия осадков на 3 %. Однако другие метрики качества прогнозов, показывающие, в частности, процент ложных прогнозов наличия или отсутствия осадков, не демонстрируют явного преимущества усвоения радиолокационных данных. Доля оправдавшихся прогнозов осадков в экспериментах с усвоением и без усвоения радиолокационных данных оказалась примерно одинаковой – 0,52–0,53.

Усвоение в модели WRF радиолокационных данных позволило более точно спрогнозировать территориальное распределение конвективных систем и центры выпадения осадков: исходный вариант прогноза позволил обнаружить 159 объектов, тогда как вариант прогноза с усвоением данных выявил 164 объекта. Точность воспроизведения центров выпадения осадков в последнем случае также оказалась выше: объекты со средней удаленностью менее 50 км с усвоением составили 22 %, без усвоения – 14 %.

Учитывая изменения структуры землепользования, природных ландшафтов и почвенно-растительного покрова под влиянием антропогенной деятельности и современных трансформаций климата, для повышения качества численных прогнозов погоды необходима регулярная актуализация параметров модели подстилающей поверхности для области прогноза. В связи с этим следующая серия численных экспериментов была направлена на оценку влияния цифровой модели подстилающей поверхности (включающей тип землепользования, почвенный покров, листовой индекс, долю поглощенной фотосинтетически активной радиации, альбедо и др.) на качество гидродинамических прогнозов для территории Беларуси.

Авторами были разработаны и реализованы (совместно с Белгидрометом Республики Беларусь) два подхода к повышению точности численных прогнозов погоды по территории Беларуси: статический (STATIC), предполагающий простую замену оригинальных наборов данных о подстилающей поверхности в системе мезомасштабного моделирования WRF на актуализированные среднемесячные данные, и динамический (DYNAMIC), в котором помимо актуализации цифровой модели подстилающей поверхности предполагается ее оперативное уточнение по мере поступления новых данных ДЗЗ.

По результатам численных экспериментов на базе модели WRF за 2021–2022 гг. оценено влияние размера и пространственного разрешения области моделирования и особенностей задания в ней

параметров подстилающей поверхности на качество численных прогнозов погоды по территории Беларуси. Установлено, что в зимний период статический способ задания параметров подстилающей поверхности позволяет уменьшить среднеквадратическую погрешность (RMSE) прогноза приземной температуры воздуха для дневных сроков +12 ч и +36 ч на 0,61 °C и 1,76 °C, а для ночных сроков +24 ч и +48 ч – на 1,46 °C и 1,98 °C соответственно (рис. 4). Коэффициент корреляции между спрогнозированными и наблюдаемыми значениями температуры в результате уточнения цифровой модели подстилающей поверхности повысился с 0,62 до 0,75, общая оправдываемость прогноза приземной температуры по ТКП возросла на 3–5 %, а для холодного периода года – на 8–11 %.

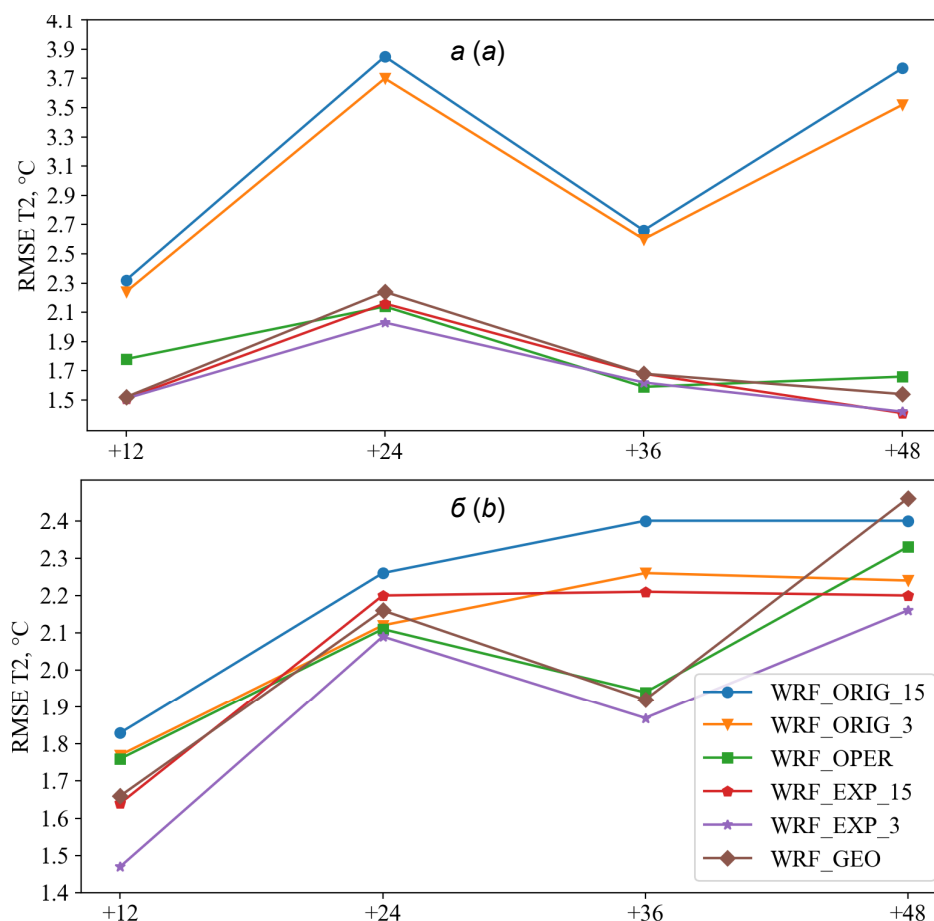


Рис. 4. Среднеквадратическая ошибка шести вариантов численного прогноза приземной температуры для холодного (а) и теплого (б) периодов 2022 г.

Fig. 4. Root-mean-square error of six variants of numerical forecast of surface temperature for cold (a) and warm (b) periods of 2022

Примечание: WRF\_ORIG\_15 – базовый прогноз с пространственным разрешением 15 км, включающий моделирование погодных условий по всей территории Европы с оригинальной для WRF цифровой моделью подстилающей поверхности; WRF\_ORIG\_3 – базовый прогноз, аналогичный WRF\_ORIG\_15, но с пространственным разрешением 3 км; WRF\_GEO (STATIC) – моделирование погодных условий по территории Беларуси с разрешением 3 км с актуализированной цифровой моделью подстилающей поверхности; WRF\_OPER (DYNAMIC) – моделирование погодных условий по территории Беларуси с разрешением 3 км и с динамическим обновлением цифровой модели подстилающей поверхности; WRF\_EXP\_3 (DYNAMIC) – моделирование погодных условий по всей территории Европы с разрешением 3 км и с динамическим обновлением цифровой модели подстилающей поверхности; WRF\_EXP\_15 (DYNAMIC) – то же, что и WRF\_EXP\_3, но с пространственным разрешением 15 км.

Note: WRF\_ORIG\_15 – basic forecast with a spatial resolution of 15 km, including modeling of weather conditions throughout Europe with an original digital model of the underlying surface for WRF; WRF\_ORIG\_3 – basic forecast similar to WRF\_ORIG\_15, but with a spatial resolution of 3 km; WRF\_GEO (STATIC) – modeling of weather conditions on the territory of Belarus with a resolution of 3 km with an updated digital WRF\_OPER (DYNAMIC) – modeling of weather conditions on the territory of Belarus with a resolution of 3 km and with a dynamic update of the digital model of the underlying surface; WRF\_EXP\_3 (DYNAMIC) – modeling of weather conditions throughout Europe with a resolution of 3 km and with a dynamic update of the digital model of the underlying surface; WRF\_EXP\_15 (DYNAMIC) – the same as WRF\_EXP\_3, but with a spatial resolution of 15 km.



Актуализация геопространственной структуры землепользования и параметров подстилающей поверхности в модели WRF также оказала положительное влияние на прогноз давления на уровне моря: среднеквадратическая ошибка для заблаговременностей +12; +24; +36 и +48 ч сократилась на 0,53; 0,78; 1,06 и 1,42 гПа соответственно. Для численного прогноза осадков наибольший положительный эффект от применения статического способа задания параметров подстилающей поверхности был отмечен для ночного времени суток (+24 ч) – общая оправдываемость повысилась на 4 % (до 85 %).

Динамическое уточнение параметров подстилающей поверхности на основе оперативных спутниковых данных (способ DYNAMIC) позволило сократить среднеквадратическую погрешность прогноза приземной температуры воздуха для сроков до +48 ч на 0,17–0,31 °C (по данным за 2022 г.). Максимальный эффект отмечен для холодного периода года: RMSE уменьшилась на 0,73–2,10 °C. Для 50 % промоделированных дней зимнего периода абсолютная ошибка прогноза температуры на 2 м уменьшилась на 5 °C и более относительно базового прогноза модели WRF. Общая оправдываемость прогноза температуры за 2022 г. повысилась на 4–9 %, а в холодный период года – на 6–15 %, в зависимости от заблаговременности. Как для зимнего, так и для летнего периода 2022 г. наибольшая общая оправдываемость прогноза приземной температуры воздуха отмечается в Минской, Гомельской и Гродненской областях, наименьшая – в Могилёвской и Витебской областях.

**Заключение.** Разработана геоинформационная система повышения оправдываемости гидро-динамического прогноза погоды для территории Беларуси, включающая блоки подготовки, контроля и усвоения данных станционных метеорологических и аэрологических наблюдений, данных радиолокационного зондирования атмосферы и ДЗЗ, а также адаптированную для региона прогноза цифровую модель подстилающей поверхности, динамически уточняемую на основе оперативных данных спутниковых наблюдений. Все компоненты системы внедрены в Белгидромете Республики Беларусь.

Оценено влияние интерполяционного и вариационного усвоения данных в мезомасштабной гидродинамической модели на оправдываемость ее краткосрочных прогнозов погоды для территории Беларуси. Показано, что:

- усвоение данных метеорологических и аэрологических станций оказывает наибольшее влияние на прогноз поля давления, позволяя уменьшить вероятность абсолютных ошибок прогноза приземного давления  $\geq 3$  гПа на 5 %;

- усвоение радиолокационных данных уменьшает среднеквадратическую ошибку прогноза скорости приземного ветра на 0,33–0,74 м/с при заблаговременности в пределах 24 ч, а также позволяет более точно спрогнозировать территориальное распределение конвективных систем и области выпадения осадков на ранних часах прогноза (до 12 ч).

В результате уточнения структуры землепользования и параметров подстилающей поверхности достигнуто повышение оправдываемости краткосрочного гидродинамического прогноза приземной температуры воздуха на территории Беларуси на 4–9 % с максимальным проявлением в Минской, Гомельской и Гродненской областях в холодный период года.

#### Список использованных источников

1. Гандин, Л. С. Объективный анализ метеорологических полей / Л. С. Гандин. – Л. : Гидрометеиздат, 1963. – 287 с.
2. Investigating 3D and 4D variational rapid-update-cycling assimilation of weather radar reflectivity for a heavy rain event in central Italy [Electronic resource] / V. Mazzarella [et al.] // Natural Hazards a. Earth System Sciences. – 2021. – Vol. 21, iss. 9. – Mode of access: <https://nhess.copernicus.org/articles/21/2849/2021/>. – Date of access: 20.01.2022.
3. System bias correction of short-term hub-height wind forecasts using the Kalman filter / J. Xu [et al.] // Protection a. Control of Mod. Power Systems. – 2021. – Vol. 6, iss. 1. – Art. № 37.
4. Лаппо, П. О. (Зайко П. О.) Результаты верификации модели WRF–ARW в Гидромете Республики Беларусь / П. О. Лаппо (П. О. Зайко), В. Н. Шакур, М. Прохареня // Тр. Гидрометеорол. науч.-исслед. центра Рос. Федерации / Федер. служба по гидрометеорологии и мониторингу окруж. среды, Гидрометеорол. науч.-исслед. центр Рос. Федерации. – М., 2015. – Вып. 358 : Гидрометеорологические прогнозы. – С. 67–77.
5. Cressman, G. P. An operational objective analysis system [Electronic resource] / G. P. Cressman // Month. Weather Rev. – 1959. – Vol. 87, iss. 10. – Mode of access: [https://journals.ametsoc.org/downloadpdf/journals/mwre/87/10/1520-0493\\_1959\\_087\\_0367\\_aooas\\_2\\_0\\_co\\_2.pdf](https://journals.ametsoc.org/downloadpdf/journals/mwre/87/10/1520-0493_1959_087_0367_aooas_2_0_co_2.pdf). – Date of access: 01.06.2020).
6. Зайко, П. О. Система усвоения наземных и аэрологических наблюдений в мезомасштабную численную модель WRF–ARW в Белгидромете / П. О. Зайко // Природные ресурсы. – 2019. – № 1. – С. 88–95.
7. Crisologo, I. Polarimetric rainfall retrieval from a C-Band weather radar in a tropical environment (The Philippines) / I. Crisologo // Asia-Pacific J. of the Atmospheric Sciences. – 2014. – Vol. 50, iss. 1. – P. 595–607.
8. Bringi, V. N. Polarimetric doppler weather radar: principles and applications / V. N. Bringi, V. Chandrasekar. – Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2001. – XXV, 636 p.

9. Новая технология объективного анализа на основе схемы 3D-VAR / М. Д. Цырульников [и др.] // Информационный сборник / Федер. служба по гидрометеорологии и мониторингу окруж. среды, Гидрометеорол. науч.-исслед. центр Рос. Федерации. – [М. ; Обнинск], 2012. – № 39 : Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – С. 7–14.
10. Inhomogeneous background error modeling for WRF-var using the NMC method / H. Wang [et al.] // J. of Appl. Meteorology a. Climatology. – 2014. – Vol. 53, iss. 10. – P. 2287–2309.
11. Охрана окружающей среды и природопользование. Гидрометеорология. Правила составления краткосрочных прогнозов погоды общего назначения : ТКП 17. 10-06-2008 (02120) : утв. М-вом природ. ресурсов и охраны окруж. среды Респ. Беларусь 31.10.08 : введ. 01.01.09. – Минск : Минприроды БелНИЦ «Экология», 2008. – IV, 30 с.
12. The method for object-based diagnostic evaluation (MODE) applied to numerical forecasts from the 2005 NSSL/SPC spring program / C. A. Davis [et al.] // Weather a. Forecasting. – 2009. – Vol. 24, iss. 5. – 1252–1267.
13. Лысенко, С. А. Оценки влияния подстилающей поверхности на точность численного прогноза температуры воздуха на территории Беларуси с использованием модели WRF / С. А. Лысенко, П. О. Зайко // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2021. – № 4. – С. 50–68.
14. A long-term global land surface satellite (GLASS) data-set for environmental studies / S. Liang, X. Zhao, S. Liu [et al.] // Intern. J. of Digital Earth. – 2013. – Vol. 6, iss. suppl. 1. – P. 5–33.
15. Лысенко, С. А. Повышение точности численных прогнозов погоды на территории Беларуси с использованием оперативных спутниковых данных / С. А. Лысенко, П. О. Зайко // Природопользование. – 2022. – № 2. – С. 86–98.
16. Copernicus Global Land Operations "Vegetation and Energy" [Electronic resource]: Moderate Dynamic Land Cover 100 m, version 3 : algorithm theoretical basis document / M. Buchhorn [et al.]. – [S. l. : s. n.], 2020. – Mode of access: <https://zenodo.org/record/4723924#.Y4YJTXbP2Uk>. – Date of access: 03.04.2021).
17. Milbrandt, J. A. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part II : A proposed three-moment closure and scheme description / J. A. Milbrandt, M. K. Yau // J. of the Atmospheric Sciences. – 2005. – Vol. 62, iss. 9. – P. 3065–3081.
18. Kain, J. S. Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme / J. S. Kain, J. M. Fritsch ; ed. by K. A. Emanuel, D. J. Raymond // The representation of cumulus convection in numerical models. – Boston, 1993. – Chap. 16. – P. 165–170.
19. Grell, G. A. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques / G. A. Grell, D. Dévényi // Geophys. Research Letters. – 2002. – Vol. 29, iss. 14. – Art. № 1693.
20. Баров, А. Н. Схема оперативного краткосрочного комплексного прогноза приземной температуры воздуха и влажности / А. Н. Баров, Ф. Л. Быков, В. А. Гордин // Метеорология и гидрология. – 2018. – № 8. – С. 5–18.
21. Зайко, П. О. Совершенствование мезомасштабного численного прогнозирования погоды WRF-ARW в Республике Беларусь путем ассимиляции радиолокационных данных о ветре и отражаемости / П. О. Зайко, А. Н. Красовский, С. К. Бородко // Журн. Белорус. гос. ун-та. География. Геология. – 2020. – № 2. – С. 3–13.

## References

1. Gandin L. S. *Obektivnyi analiz meteorologicheskikh polei* [Objective analysis of meteorological fields]. Leningrad, Gidrometizdat, 1963, 287 p. (in Russian)
2. Mazzarella V., Ferretti R., Picciotti E., Marzano F. S. Investigating 3D and 4D variational rapid-update-cycling assimilation of weather radar reflectivity for a heavy rain event in central Italy. *Natural Hazards a. Earth System Sciences*, 2021, vol. 21, iss. 9. Available at: <https://nhess.copernicus.org/articles/21/2849/2021/> (access January 20, 2022).
3. Xu J., Xiao Z., Lin Z., Li M. System bias correction of short-term hub-height wind forecasts using the Kalman filter. *Protection a. Control of Mod. Power Systems*, 2021, vol. 6, iss. 1, art. № 37.
4. Lapo P. O. (Zaiko P. O.), Shakur V. N., Proharenai M. P. *Resultaty verifikatsii modeli WRF-ARW v Hydromet Respubliki Belarus* [Verification of WRF-ARW model in Hydromet of the Republic of Belarus]. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo centra Rossijskoj Federacii* [Proc. of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation]. *Federalnaya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushej sredy, Gidrometeorologicheskij nauchno-issledovatel'skij centr Rossijskoj Federacii* [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation]. 2015, iss. 358, pp. 67–77. (in Russian)
5. Cressman G. P. An operational objective analysis system. *Month. Weather Rev.*, 1959, Vol. 87, iss. 10. Available at: [https://journals.ametsoc.org/downloadpdf/journals/mwre/87/10/1520-0493\\_1959\\_087\\_0367\\_aoas\\_2\\_0\\_co\\_2.pdf](https://journals.ametsoc.org/downloadpdf/journals/mwre/87/10/1520-0493_1959_087_0367_aoas_2_0_co_2.pdf) (accessed June 1, 2020).
6. Zaiko P. O. *Sistema ucvoenia nazemnich i aerologicheskikh nabludenii v mezomostabnuy cheslennyy model WRF-ARW v Belgidromete* [System for assimilation of ground-based and aerological observations into the mesoscale numerical model WRF-ARW at Belhydromet]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 2019, no. 1, pp. 88–95. (in Russian)
7. Crisologo I. Polarimetric rainfall retrieval from a C-Band weather radar in a tropical environment (The Philippines) // *Asia-Pacific J. of the Atmospheric Sciences*, 2014, vol. 50, iss. 1, pp. 595–607.
8. Bringi V. N., Chandrasekar V. *Polarimetric doppler weather radar: principles and applications*. Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2001, XXV, 636 p.

9. Cirulnikov M. D., Svireno P. I., Gorin V. E. [et al.] *Novai technologiya obiektnogo analiza na osnove shemy 3D-VAR* [New objective analysis technology based on 3D-VAR scheme]. Obninsk, 2012, no. 39, pp. 7–14. (in Russian)
10. Wang H., Huang X.-Y., Sun J. [et al.] Inhomogeneous background error modeling for WRF-var using the NMC method. *J. of Appl. Meteorology a. Climatology*, 2014, vol. 53, iss. 10, pp. 2287–2309.
11. *Ohrana okrugauschei sredy. Hydrometeorologia. Pravila sostavleniya* [Environmental protection and natural resource management. Hydrometeorology. Rules for compiling short-term weather forecasts for general purposes: TKP 17.10-06-2008 (02120): approved. M-vom nature. resources and environmental protection. environment Rep. Belarus 10/31/08: introduced. 01/01/09]. Minsk, 2008, no. IV, 30 p. (in Russian)
12. Davis C. A., Brown B. G., Bullock R., Halley-Gotway J. The method for object-based diagnostic evaluation (MODE) applied to numerical forecasts from the 2005 NSSL/SPC spring program. *Weather a. Forecasting*, 2009, vol. 24, iss. 5, pp. 1252–1267.
13. Lysenko S. A., Zaiko P. O. *Ocenki vliyaniya podstilayushchej poverhnosti na tochnost' chislennogo prognoza temperatury vozduha na territorii Belarusi s ispol'zovaniem modeli WRF* [Estimation of the study of the underlying surface on the accuracy of the calculated forecast of air temperature on the territory of Belarus using the WRF model]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy = Hydrometeorological research and forecasts*, 2021, no. 4 (382), pp. 50–68. (in Russian)
14. Liang S., Zhao X., Liu S. [et al.] A long-term global land surface satellite (GLASS) data-set for environmental studies. *Intern. J. of Digital Earth.*, 2013, Vol. 6, iss. suppl. 1, pp. 5–33.
15. Lysenko S. A., Zaiko P. O. *Povyschenie tochnosti chislennich prognozov pogody na territorii Belarusi s ispolzovaniem operativnich sputnikovich dannich* [Improving the accuracy of numerical weather forecasts in Belarus using operational satellite data]. *Prirodopolzovanie = Nature Management*, 2022, no. 2, pp. 86–98. (in Russian)
16. Buchhorn M., Bertels L., Smets B. [et al.] Copernicus Global Land Operations "Vegetation and Energy": Moderate Dynamic Land Cover 100 m, version 3: algorithm theoretical basis document [S. l. : s. n.], 2020. Available at: <https://zenodo.org/record/4723924#.Y4YJTXbP2Uk> (accessed April 3, 2021).
17. Milbrandt J. A., Yau M. K. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part II : A proposed three-moment closure and scheme description. *J. of the Atmospheric Sciences*, 2005, vol. 62, iss. 9, pp. 3065–3081.
18. Kain J. S., Fritsch J. M. Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. *The representation of cumulus convection in numerical models*. Ed. by K. A. Emanuel, D. J. Raymond. Boston, 1993, chap. 16, pp. 165–170.
19. Grell G. A., Dévényi, D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophys. Research Letters*, 2002, vol. 29, iss. 14, art. no. 1693.
20. Bagrov A. N., Bykov F. L., Gordin V. A. *Schema operativnogo kratkosrochnogo kompleksnogo prognoza prizemnoi temperatury vozduha i vlagnosti* [Scheme of operational short-term comprehensive forecast of surface air temperature and humidity]. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*, Moscow, 2018, no. 8, pp. 5–18. (in Russian)
21. Zaiko P. O., Krasouski A. N., Barodka S. K. *Sovershenstvovnie mesomashtabnogo chislennogo prognozirovaniya pogody WRF-ARW v Respublike Belarus putem assimilacii radiolokacionnich dannich o vetre i otrazaemosti* [Improvement of mesoscale numerical weather prediction WRF-ARW in the Republic of Belarus by assimilation of radar wind and reflectivity data]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geologiya = Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*, 2020, no. 2, pp. 3–13. (in Russian).

#### Информация об авторах

**Лысенко Сергей Александрович** – доктор физико-математических наук, профессор, директор, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: [lysenko.nature@gmail.com](mailto:lysenko.nature@gmail.com)

**Зайко Полина Олеговна** – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: [polly\\_lo@tut.by](mailto:polly_lo@tut.by)

#### Information about the authors

**Sergey A. Lysenko** – D. Sc. (Physical and Mathematical), Professor, Director, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: [lysenko.nature@gmail.com](mailto:lysenko.nature@gmail.com)

**Polina O. Zaiko** – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: [polly\\_lo@tut.by](mailto:polly_lo@tut.by)