

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-4-6-29>

УДК 551.509.32+551.509.51

**Формирование продукции
систем негидростатического моделирования атмосферы
COSMO-RuBy (Гидрометцентр России)
и WRF-ARW (Белгидромет) для краткосрочного
прогноза погоды**

***И.А. Розинкина^{1,3}, Г.С. Ривин^{1,3}, Р.Н. Бурак², Е.Д. Астахова¹,
Ю.В. Алферов¹, Д.В. Блинов¹, Ф.Л. Быков¹, Д.В. Васькова¹,
В.А. Волкова¹, Е.В. Воробьева¹, П.О. Зайко², И.И. Жабина¹,
А.Ю. Недачина¹, М.И. Прохареня², Г.В. Елисеев¹***

¹ *Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

² *Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного
загрязнения и мониторингу окружающей среды (Белгидромет),
г. Минск, Республика Беларусь;*

³ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
г. Москва, Россия*

Рассматриваются результаты работ по созданию продуктов систем негидростатического краткосрочного численного прогноза погоды (ЧПП) в Гидрометцентре России – COSMO-RuBy с шагом вычислительной сетки 2,2 км и в Белгидромете – WRF-ARW с шагом сетки 3 км. Важными результатами являются организация обмена унифицированной продукцией между странами и создание в Гидрометцентре России двух технологий для получения объединенного продукта: ансамблевого лагированного прогноза и системы комплексной коррекции результатов моделирования на основе машинного обучения. На основе обратной связи с прогнозистами обеих стран в Гидрометцентре России создан специализированный Интернет-сайт, обеспечивающий удобную работу прогнозистов с результатами COSMO-RuBy и объединенными продуктами. В Белгидромете реализованы системы совместной визуализации и верификации результатов COSMO-RuBy и WRF-ARW.

Ключевые слова: численный прогноз погоды, ансамблевый прогноз, визуализация, машинное обучение

Forming of the products of non-hydrostatic modelling systems for short-range weather prediction COSMO-RuBy (Hydrometcentre of Russia) и WRF-ARW (Belhydromet)

I.A. Rozinkina^{1,3}, G.S. Rivin^{1,3}, R.N. Burak², E.D. Astakhova¹, Yu.V. Alferov¹, D.V. Blinov¹, Ph.L. Bykov¹, D.V. Vaskova¹, V.A. Volkova¹, E.V. Vorob'eva¹, P.O. Zayko², I.I. Zhabina¹, A.Yu. Nedachina¹, M.I. Prockharenya², G.V. Eliseev¹

¹Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

²Center of Hydrometeorology, Radioactive Contamination and Environmental Monitoring of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus;

³Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The paper considers the results of activities on the development of output products for the non-hydrostatic short-range numerical weather prediction systems: COSMO-RuBy with a grid spacing of 2.2 km at the Hydrometcentre of Russia and WRF-ARW with a grid spacing of 3 km in Belhydromet. The important results of the activities are the organization of the exchange of unified products between the countries and the development at the Hydrometcentre of Russia of two technologies for obtaining the unified products: the multi-model lagged ensemble system and the system for the complex correction based on machine learning of model results. A specialized web-site providing convenient work of forecasters with the COSMO-RuBy results and unified products was created at the Hydrometcentre of Russia based on the feedback from forecasters. The systems of common visualization and verification of COSMO-RuBy and WRF-ARW results are implemented in Belhydromet.

Keywords: numerical weather prediction, ensemble forecasting, visualization, machine learning

Введение

Важной областью сотрудничества Российской Федерации и Республики Беларусь в сфере гидрометеорологии более 20 лет является участие в программах Союзного государства. С 2017 года выполняется программа «Развитие системы гидрометеорологической безопасности Союзного государства» на 2017–2021 годы (далее – Программа). В рамках 1-го мероприятия Программы «Повышение качества гидрометеорологических прогнозов и обнаружения опасных гидрометеорологических явлений» выполняются работы по развитию негидростатического моделирования атмосферных процессов в региональном масштабе с высокой пространственной и временной детализацией.

В Российской Федерации (ФГБУ «Гидрометцентр России») и в Республике Беларусь (ГУ «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды», далее Белгидромет) созданы конфигурации (версии) негидростатических мезомасштабных моделей атмосферы высокой детализации, адаптированные для краткосрочного прогнозирования погоды по территории

Республики Беларусь и западной части Российской Федерации. Система негидростатического численного прогноза Гидрометцентра России (модель COSMO-RuBy) была создана на основе негидростатической мезомасштабной модели COSMO-Ru [5], являющейся национальным вариантом модели COSMO, развиваемой одноименным международным консорциумом COSMO (Consortium for Small-scale atmospheric Modeling, сайт: www.cosmo-model.org), членом которого является Российская Федерация [4]. Программный комплекс модели COSMO эффективно использует суперкомпьютерные вычислительные ресурсы, что обеспечивает достаточно быстрый оперативный счет с высоким разрешением для обширных территорий. Версия Белгидромета была создана на основе мезомасштабной модели WRF-ARW [<https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>].

Области прогнозирования моделей COSMO-RuBy и WRF-ARW представлены на рис. 1.

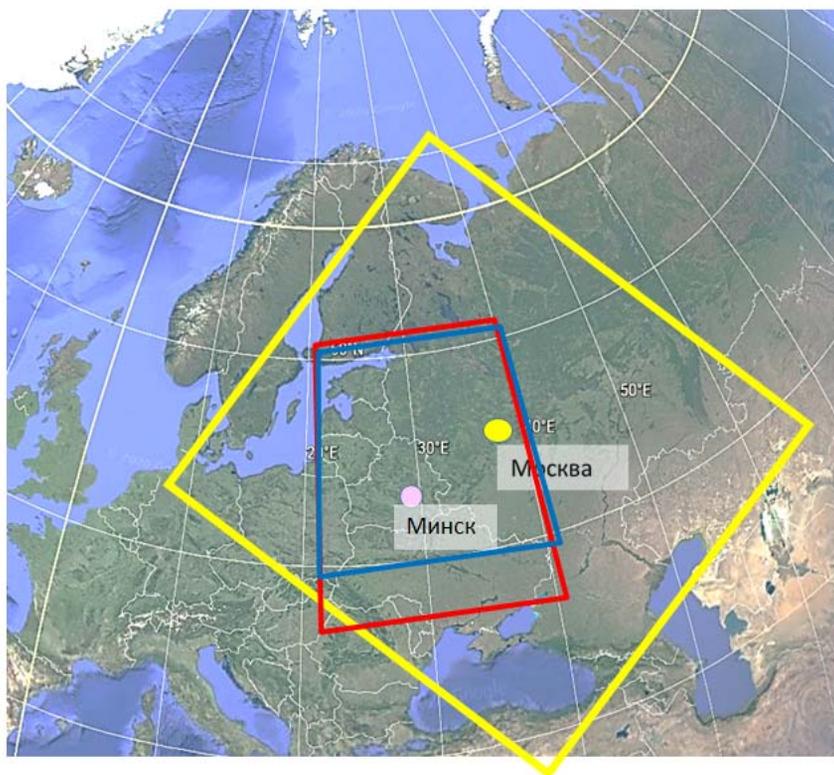


Рис. 1. Области прогнозирования COSMO-RuBy Гидрометцентра России (выделена желтой линией), WRF-ARW Белгидромета (выделена красной линией) и область формирования продукции для взаимного обмена (выделена синей линией).

Fig. 1. Domains of COSMO-RuBy, Hydrometcenter of Russia (yellow contour); WRF-ARW, Belhydromet (red) and common area for exchanges of modelling results between Hydrometcenter of Russia and Belhydromet (blue).

Согласованная со специалистами Белгидромета область вычислений модели COSMO-RuBy охватывает территорию Республики Беларусь, запад и центр Европейской территории России и ряд прилегающих регионов. При этом учитывалось, что для прогнозистов Республики Беларусь актуальнее оказалось включение более западных регионов, а для прогнозистов западных регионов России – северо-западных и южных. За счет реализации согласованной области прогнозирования, продукция модели COSMO-RuBy оказалась востребованным информационным ресурсом для синоптиков Росгидромета и Белгидромета. При этом синоптики Росгидромета используют продукцию COSMO-RuBy не только для прогнозирования погоды по соседствующим с Республикой Беларусь Центральному и Северо-Западному федеральным округам, но также по Южному и частично Приволжскому федеральным округам.

На рис. 1 также представлена выделенная синей линией область, для которой производится обмен информацией между Белгидрометом и Гидрометцентром России, необходимый для объединения (комплексирования) прогностической продукции моделей COSMO-RuBy и WRF-ARW. Обмен прогностическими данными между Белгидрометом и Росгидрометом ведется начиная с IV квартала 2020 года через ftp-сервер в формате GRIB1. Стороны обмениваются информацией, вычисленной по начальным срокам 00.00 и 12.00 ч ВСВ. Для формирования совместных продуктов в Гидрометцентре России используются результаты вычислений COSMO-RuBy по начальным данным по срокам 00, 06, 12 и 18 ч ВСВ.

1. Краткое описание новых технологий численного прогнозирования и визуализации Гидрометцентра России и Белгидромета

Система прогнозирования COSMO-RuBy создана специалистами Гидрометцентра России в рамках выполнения Программы в период с 2017 по 2019 год. Основные характеристики системы прогнозирования: используется «сдвинутая» сферическая система координат [4], шаг расчетной сетки составляет 2,2 км; продукция выпускается четыре раза в сутки по начальным данным за сроки 00, 06, 12 и 18 ч ВСВ и включает в графических форматах прогностические карты метеорологических полей, метеограммы, аэрологические диаграммы; цифровая продукция кодируется в формате GRIB2; в рамках технологии производится дополнительное усвоение данных синоптической сети и сети доплеровских метеорологических радиолокаторов (ДМРЛ).

Начальные поля и данные на границах для модели COSMO-RuBy формируются с использованием продукции модели COSMO-RuBENA с более грубым разрешением (шаг расчетной сетки 6.6 км). Модель COSMO-RuBENA с 2018 года функционирует на суперкомпьютере CRAY «Росгидромет». Конфигурация COSMO-RuBENA имеет область прогнозирования, охватывающую всю территорию России и обширные

прилегающие регионы [5]; период прогнозирования модели – до 120 часов. Согласно решению ЦМКП от 11 марта 2021 г., данная система рекомендована в качестве основного метода численного краткосрочного прогноза погоды для прогностических организаций Росгидромета. Информация на границах и начальные поля для модели COSMO-Ru6ENA поступают в Росгидромет из системы глобального моделирования Немецкой службы погоды в соответствии с уставом Консорциума COSMO. Обе конфигурации модели (COSMO-RuBy и COSMO-Ru6ENA) функционируют в рамках единой технологической системы COSMO-Ru.

Результаты опытной эксплуатации COSMO-RuBy свидетельствуют о высокой надежности прогнозирования явлений погоды на ближайшие сутки, в том числе – с применением специальных индексов, характеризующих степень угроз опасных явлений конвективной природы – гроз, града, порывов ветра, сильных осадков.

Для визуализации и представления информации системы COSMO-Ru в Гидрометцентре России создан специализированный интернет-сайт (с авторизованным доступом), на котором размещается графическая продукция системы COSMO-RuBy, продукция других компонент прогностической системы COSMO-Ru, а также объединенная ансамблевая продукция систем негидростатического моделирования обеих стран, (<https://u2019.meteoinfo.ru/services/belarus/index.php>), рассматриваемая в дальнейших разделах. При разработке сайта учитывался опыт и рекомендации прогнозистов Белгидромета и Гидрометцентра России. С учетом этих рекомендаций был реализован двухоконный интерфейс представления информации, позволяющий синоптикам эффективнее и быстрее анализировать большие объемы информации. Примеры представления информации на сайте приведены на рис. 2.

В верхней части рисунка представлена стартовая страница (слева) и карта для всей области вычислений прогноза для температуры воздуха (справа). В нижней части рисунка в качестве примера представлена страница, включающая карту прогнозов порывов ветра (левое «окно») и прогностическая аэрологическая диаграмма (правое «окно»).

В Белгидромете была реализована прогностическая система близкого класса на основе модели WRF-ARW. Реализованная в Белгидромете конфигурация получила наименование «рабочая версия WRF-ARW». Основные характеристики этой системы прогнозирования: используется расчетная сетка в проекции Ламберта, шаг расчетной сетки составляет 3 км; продукция выпускается два раза в сутки по срокам начальных данных 00 и 12 ч ВСВ.

Вычисления по рабочей версии WRF-ARW производятся с использованием начальных и боковых условий, получаемых по конфигурации модели WRF-ARW с шагом расчетной сетки 15 км для более крупной области прогноза, в свою очередь использующей в качестве начальных данных и данных на границах области прогноза результаты глобального моделирования NCEP.

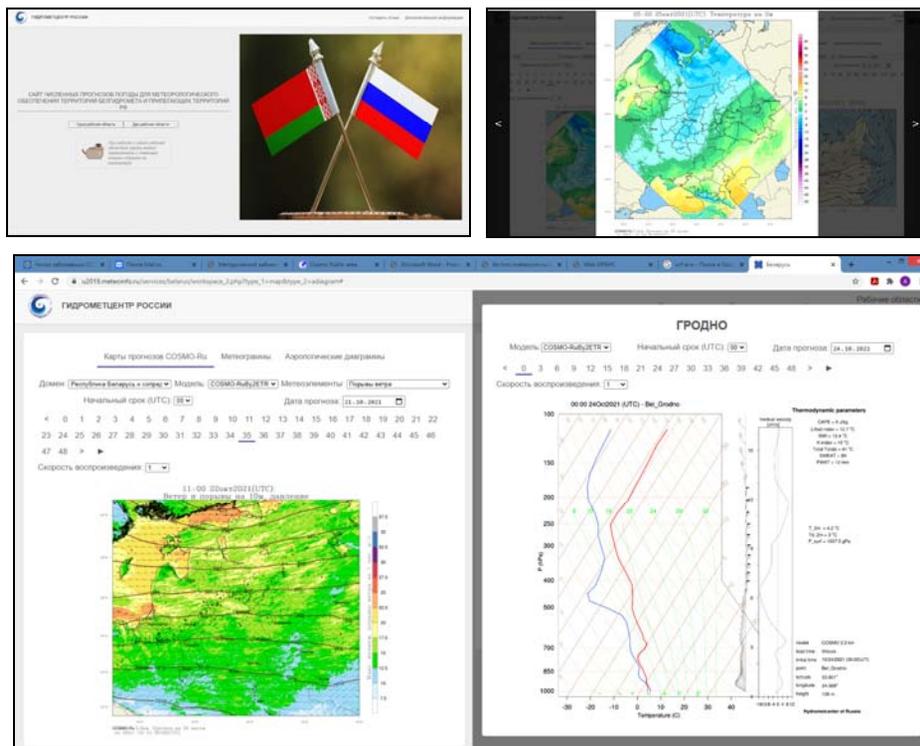


Рис. 2. Страницы сайта, на котором представлена продукция модели COSMO-RuBy.

Fig. 2. Examples of pages of the site with COSMO-RuBy products.

Специалистами Белгидромета для создания рабочей версии WRF-ARW был выполнен ряд настроек для формирования необходимого района прогнозирования, а также произведен выбор схем параметризаций физических процессов в атмосфере для адаптации к особенностям территории прогнозирования.

Продукция Рабочей версии визуализируется с помощью пакета GrADS в виде метеограмм, аэрологических диаграмм, карт, часть продукции размещается на сайте <https://www.meteoinfo.by/wrf3/> (рис. 3).

Цифровая продукция Рабочей версии кодируется в формате GRIB1. Ряд продуктов Рабочей версии WRF-ARW визуализируются также в виде карта-схем, таблиц, графиков на основе АРМ синоптика-прогнозиста, разработанного специалистами Белгидромета и функционирующего в прогностических подразделениях. При создании визуализированных продуктов специалисты Белгидромета применили ряд важных с методической точки зрения приемов, облегчающих интерпретацию результатов. Например, прогностические карты ряда параметров сопровождаются таблицами соответствия. В частности, для отображаемых на картах значений

радиолокационной отражаемости приведены соответствующие значениям отражаемости наиболее вероятные явления погоды и их интенсивность, а значениям высоты нулевой изотермы – различные градации характеристик фазового состава осадков.

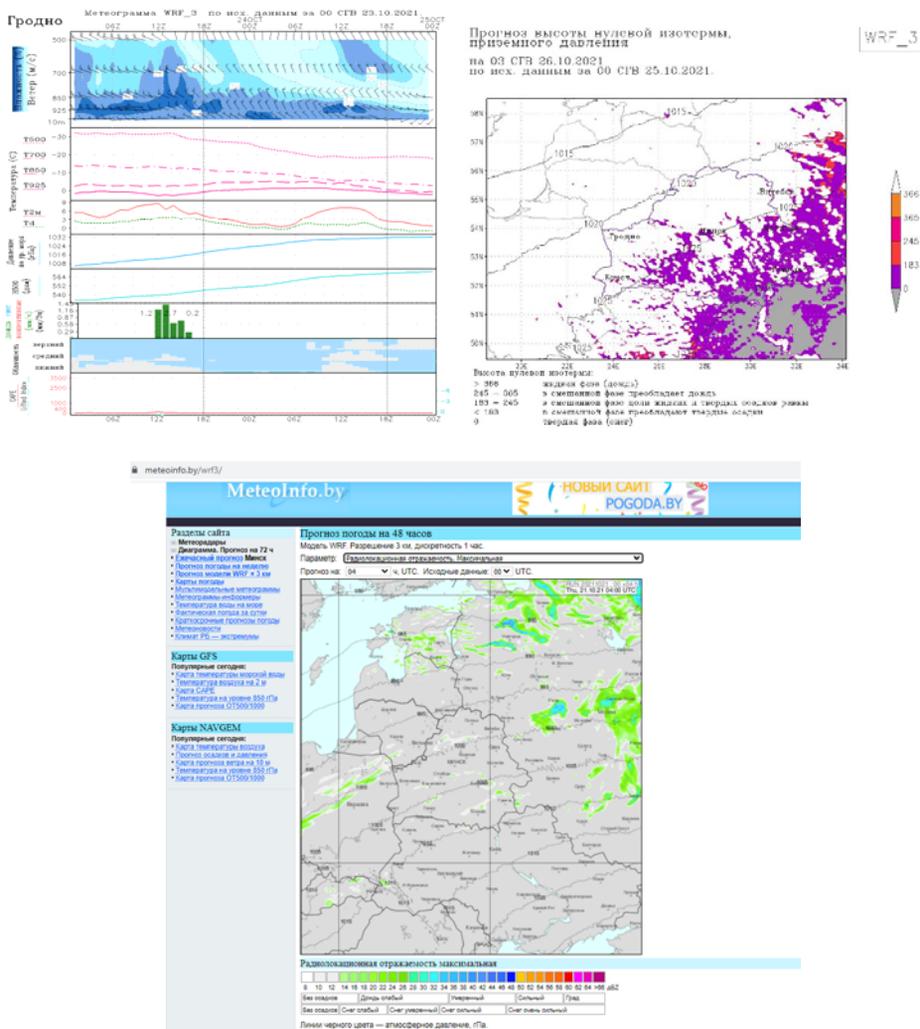


Рис. 3. Примеры продукции Рабочей версии WRF-ARW Белгидромета (<https://www.meteoinfo.by/wrf3/>): сверху – карты прогнозов радиолокационной отражаемости (слева), высоты нулевой изотермы (справа); внизу – метеограмма для г. Гродно.

Fid. 3. Examples of products of WRF-ARW of BelHydromet (<https://www.meteoinfo.by/wrf3/>): Top: forecast charts of radar reflectivity (left) and of zero isotherm (right), bottom: Meteogramme for Grodno.

Близкий класс прогностических моделей Гидрометцентра России и Белгидромета, различающихся алгоритмическим наполнением и источниками начальных данных, создал предпосылки для возможного объединения (комплексирования) продукции этих моделей по общей области вычислений (см. рис. 1).

Такое объединение позволяет рассчитывать на повышение надежности прогнозирования, а также обеспечивает получение прогностической продукции в вероятностной форме, т. е. важной информации об априорной неопределенности прогнозов. Комплексирование продукции обеих моделей также может снизить риски ошибок детерминированных прогнозов, обусловленных приближениями численного моделирования и стохастической природой атмосферных процессов.

2. Создание технологий для получения объединенных продуктов

Объединение продукции, выпускаемой системами ЧПП COSMO-RuBy (Гидрометцентр России) и WRF-ARW (Белгидромет) потребовало решения ряда методических и технологических вопросов.

Указанные модели имеют различные области вычислений, разную топографическую основу, различаются шагом расчетных сеток, имеют разные регламенты выпуска и форматы кодирования продукции. Область вычислений Белгидромета несколько больше распространена на запад, а Росгидромета – на восток, при этом подавляющая часть области Рабочей версии WRF-ARW находится внутри домена COSMO-RuBy (см. рис. 1).

В 2019 году специалистами Гидрометцентра России и Белгидромета была согласована общая область прогнозирования для обмена, в которой производится интерполяция результатов прогнозирования по двум моделям на единую географическую широтно-долготную сетку высокого пространственного разрешения с шагом $0,025^\circ$, согласовано использование для кодирования продукции формата GRIB1, реализован обмен результатами прогноза через сервер ГВЦ Росгидромета (на основании ftp протокола) на широтно-долготной сетке с шагом 0.025° (ориентировочным объемом 4 Гб в сутки).

Для организации взаимного обмена и дальнейшего объединения (комплексирования) информации в прогностические системы Гидрометцентра России и Белгидромета понадобилось включить дополнительные процессы, которые представлены в табл. 1.

Также была согласована номенклатура передаваемой продукции, включающая все ключевые метеорологические параметры, необходимые для краткосрочного прогноза элементов приземной погоды.

Таблица 1. Характеристики новых технологических процессов для организации взаимного обмена продукцией ЧПП
Table 1. The new technological processes for non-hydrostatic NWP product exchanges

Добавленный технологический процесс	Технология COSMO-RuBy	Технология WRF- ARW
Модификации в технологии вычислений и формирования результатов		
Периодичность	Для каждого сеанса счета 4 раза в сутки. Шаг 1 час	Для каждого сеанса счета 2 раза в сутки. Шаг 1 час
Раскодирование	Из файлов GRIB2 по всей области вычислений	Из файлов GRIB1 по всей области вычислений
Отбор результатов моделирования	По координатам согласованного региона по согласованной номенклатуре	
Интерполяция	С вычислительной сетки модели на согласованную широтно-долготную сетку 0.025°×0.025°	
Формирование результатов	Запись в базу данных Гидрометцентра России	Формирование GRIB1 из массивов отобранной продукции
Изменения в системах передачи-данных. Отправка данных		
Периодичность	По мере готовности продукции, 2 раза в сутки, не позднее 05 и 19 ч ВСВ	По мере готовности продукции 2 раза в сутки, не позднее 07 и 21 ч ВСВ
Источник данных	Базы данных Гидрометцентра России	Формирование в процессе счета
Кодирование	Формат GRIB1	Выполнено на этапе формирования результатов
Размещение продукции	На ftp сервере ФГБУ «ГВЦ Росгидромета»	
Изменения в системах передачи-данных. Получение данных		
Периодичность, время	2 раза в сутки, по мере поступления	2 раза в сутки, по мере поступления
Источник продукции	ftp-сервер ФГБУ «ГВЦ Росгидромета»	
Раскодирование	Раскодирование из GRIB1	
Размещение	В пользовательских базах данных Гидрометцентра России	В пользовательских базах данных Белгидромета

3. Создание объединенных продуктов в Белгидромете и Гидрометцентре России

3.1. Технология визуальной комплексации и верификации Белгидромета

В Белгидромете поступающие из Гидрометцентра России цифровые данные были включены в систему визуализации в АРМ синоптика-прогнозиста Белгидромета в виде карт, таблиц, графиков. Была выполнена работа по интерполяции данных в пункты метеостанций Республики Беларусь для представления их на карта-схеме согласно пуансону наноски (пример на рис. 4).

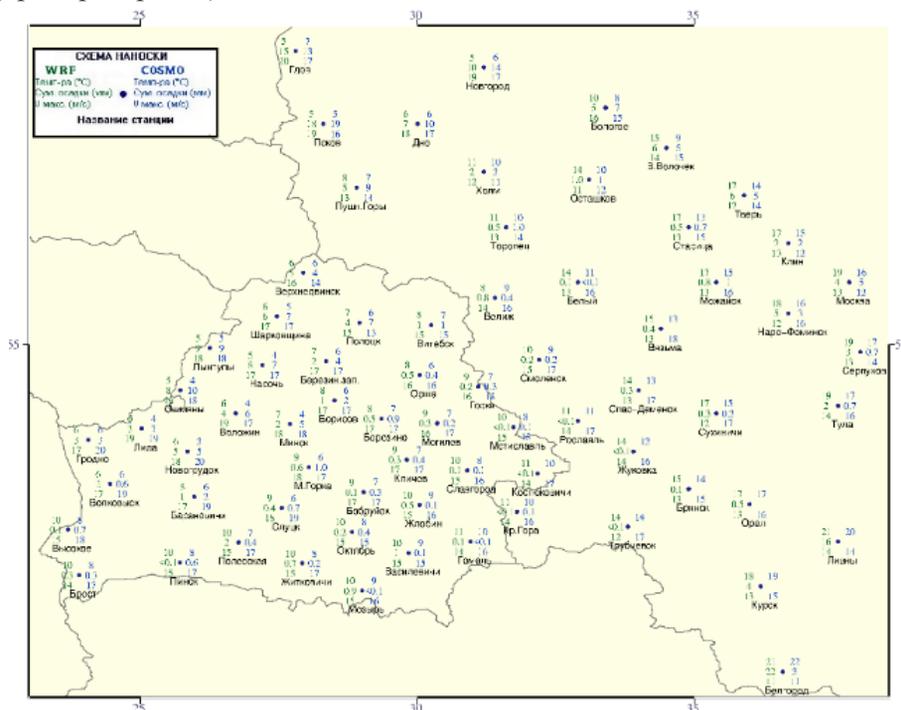


Рис. 4. Пример карты с наноской для пунктов Республики Беларусь прогностических значений метеопараметров, рассчитанных по двум моделям. В пуансоне пункта в колонке слева: результаты модели WRF-ARW, справа: модели COSMO-RuBy.

Fig. 4. Example of mapped forecast values for points of Belarus by WRF-ARW (left columns) and COSMO-RuBy (right columns).

Такие карты позволяют синоптику одновременно видеть результаты прогнозирования по двум моделям, анализировать разброс в прогностических значениях различных метеопараметров, что особенно важно в случаях быстрых изменений погоды, оценить степень угроз и неопределенностей при прогнозировании быстроразвивающихся опасных явлений.

На рис. 5 представлена визуализация временного хода прогностических и фактических значений сумм осадков за 12 часов (полусуточных) и температуры для выбранного пункта (метеостанции) для двух моделей.

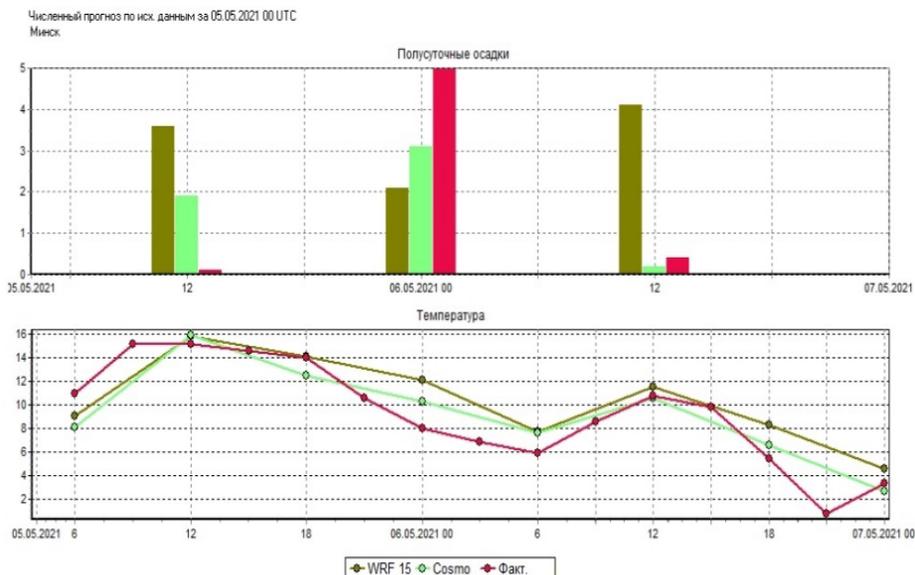


Рис. 5. Пример визуализации временного хода прогностических и фактических значений полусуточных осадков и температуры для выбранного пункта (метеостанции). Темно-зеленым цветом обозначена продукция Рабочей версии WRF-ARW, светло-зеленым цветом – продукция модели COSMO-RuBy, красным цветом – данные измерений в пунктах метеостанций.

Fig. 5. Example of visualization of forecast and measured values of 12h-precipitation sums and 2m temperatures. Dark green: forecasts of WRF-ARW of Belhydromet, light-green: forecasts of COSMO-RuBy of Hydrometcenter of Russia, red: observations.

Помимо этого, была расширена система вычисления оценок успешности прогнозов с применением распространяемого на безвозмездной основе пакета MET (Model Evaluation Tools) [<https://dtcenter.org/community-code/model-evaluation-tools-met>] для обеспечения сравнительного мониторинга успешности прогнозов метеопараметров у земной поверхности.

3.2. Создание объединенных продуктов в Гидрометцентре России

В Гидрометцентре России на основе прогностической продукции, поступающей от обоих источников, реализованы две технологии ее объединения: 1) лагированного ансамблевого прогноза; 2) комплексной статистической коррекции с применением машинного обучения.

3.2.1. Технология «Ансамблевый лагированный прогноз»

Термин лагирование в данном контексте означает использование прогнозов, вычисленных на один и тот же момент времени от нескольких последовательных начальных сроков. Такое объединение возможно для таких прогнозов, качество которых остается близким на некотором интервале заблаговременностей. Для краткосрочного численного прогноза на сутки вперед допустимо объединение прогнозов, стартовавших в 12-часовом интервале, предшествующем самому последнему сроку начальных данных.

Созданная в рамках данного проекта система ансамблевого прогноза EPS-RuBy является мульти-анализной и мульти-модельной [9]. В ней используются прогнозы по двум различным моделям: COSMO-RuBy и WRF-ARW, в которых используются различные начальные данные (анализы). Однако использование только двух реализаций прогноза недостаточно для функционирования ансамблевой системы. Поэтому для увеличения размера ансамбля в него были включены три последовательных прогноза (с шагом 6 часов) по COSMO-RuBy и два последовательных прогноза (с шагом 12 часов) по модели WRF-ARW, имеющих качество, соизмеримое с качеством самого «нового» прогноза. Итоговая схема ансамбля EPS-RuBy представлена на рис. 6. Максимальная заблаговременность ансамблевого прогноза при таком подходе – 36 часов, размер ансамбля – 5 реализаций.

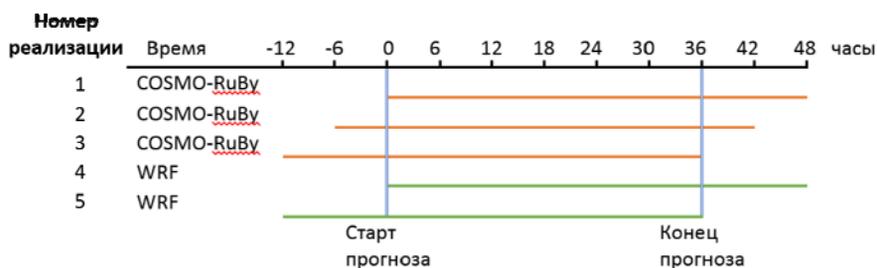


Рис. 6. Схема формирования ансамбля EPS-RuBy.

Fig. 6. EPS-RuBy formation diagram.

Несмотря на небольшой размер ансамбля, данная разработка имеет большое методическое значение как первая технология высокодетального краткосрочного ансамбля прогнозов элементов погоды, реализованная в России.

В Гидрометцентре России для оптимизации работы при построении ансамблей был создан ряд оперативных циклических (ежедневно обновляемых) специализированных баз данных в рамках системы автоматизированной обработки информации Гидрометцентра России [3]. Перечень

и характеристики метеопараметров, прогнозы которых подлежат «ансамблированию», включая их осредненные по всем реализациям, представлены в табл. 2, а ряд результатов совместной обработки детерминированных прогнозов – в табл. 3. Приведенные таблицы раскрывают состав одной из разработанных баз данных (EPSB) для функционирования и выпуска продукции данной ансамблевой системы.

Кроме прогностических реализаций, в базе содержатся значения средних по ансамблю, характеристики разброса прогнозов в ансамбле и прогностические значения вероятностей. Средние по ансамблю рассчитываются как среднее арифметическое значений, полученных во всех реализациях ансамбля. Разброс прогнозов в ансамбле определяется как среднеквадратическое отклонение от среднего по ансамблю [6]. Прогностические вероятности – это число реализаций, в которых наблюдалось наперед заданное событие, деленное на размер ансамбля. События, для которых определялись прогностические вероятности, и соответствующие заблаговременности прогноза представлены в табл. 2.

Таблица 2. Состав базы данных: прогностические реализации и средние по ансамблю

Table 2. Content of database: Ensemble members and mean values

Метеорологическая характеристика	Имя в базе данных EPSB (примеры для максимальной заблаговременности)	Размерность, диапазон значений	Заблаговременность прогноза, часы
Суммарные осадки, аккумулярованные с начала прогноза	B99B036A	мм, 0-2000	От 0 до 36 ч с шагом 1 ч
Суммарные осадки (сумма за 12 часов)	I99B036A	мм, 0-400	12, 18, 24, 30, 36 ч
Суммарные осадки (сумма за 24 часа)	J99B036A	мм, 0-800	24, 30, 36 ч
Осадки в виде снега, аккумулярованные с начала прогноза	X99B036A	мм, 0-2000	От 0 до 36 ч с шагом 1 ч
Осадки в виде снега (сумма за 12 часов)	S99B036A	мм, 0-200	12, 18, 24, 30, 36 ч
Температура на уровне 2 м	T99B036A	°С, -120° - +60°	От 0 до 36 ч с шагом 1 ч
Компоненты скорости ветра на 10 м	U99B036A V99B036A	м/с, -127 - +127	От 0 до 36 ч с шагом 1 ч
Порывы ветра на 10 м	G99B036A	м/с, 0-127	От 0 до 36 ч с шагом 1 ч

Таблица 3. Состав базы данных EPSB с результатами ансамблевых прогнозов по системе EPS-RuBy: прогностические вероятности
Table 3. Content of database with EPS-RuBy results: forecast probabilities

Метеорологическая характеристика	Имя в базе данных (примеры для различных заблаговременностей)	Размерность, диапазон значений	Заблаговременность прогноза
Вероятность 24-часовых сумм. осадков (снег+дождь), превышающих 1, 10, 20, 50 мм	B24BEXPA	%, 0–100	24, 30, 36 ч
Вероятность 12-часовых сумм. осадков (снег+дождь), превышающих 1, 10, 20, 50 мм	B12BEXPA	%, 0–100	12, 18, 24, 30, 36 ч
Вероятность 12-часовых сумм. осадков в виде снега, превышающих 1, 5, 10, 20 мм	S12BEXPA	% 0–100	12, 18, 24, 30, 36 ч
Вероятность порывов скорости ветра на 10 м, превышающих 5, 10, 15, 25 м/с	G99BEXPA	% 0–100	От 6 до 36 ч с шагом 6 ч

В качестве входной информации для базы EPSB используются не непосредственно файлы прогнозов в форматах GRIB1, а содержимое специально созданных для решения этих задач внутренних баз данных RUS2 и BEL2, что более технологично.

Прогнозы COSMO-RuBy попадают в базу EPSB сразу же после заполнения базы RUS2 (примерно в 2.50 ч ВСВ и 14.50 ч ВСВ по исходным срокам 00 и 12 ч ВСВ соответственно), т. е. когда появляются соответствующие прогнозы на 48 часов. Прогнозы по WRF-ARW Белгидромета берутся из базы данных BEL2, при этом одновременно записываются две прогностические реализации 4 (дата текущая) и 5 (дата 12 часов назад). Прогнозы в базе готовы в 6.00 для срока 00 ч и в 18.00 для срока 12 ч ВСВ.

Расчет средних и разбросов в ансамбле, а также прогностических вероятностей осуществляется отдельной задачей, запускаемой через 6 ч 30 мин после срока наблюдений (то есть в 6.30 для срока 00 ч и в 18.30 для срока 12 ч ВСВ).

Задача автоматической подготовки карт с результатами ансамблевого прогноза запускается через 7 часов после срока наблюдения, т. е. в 7.00 для срока 00 ч и в 19.00 для срока 12 ч ВСВ. Затем полученные карты автоматически пересылаются на специализированный сайт с продукцией COSMO-RuBy (см выше), в раздел ансамблевых прогнозов: http://u2019.meteoinfo.ru/services/belarus/workspace_1.php?type=ensemble.

Системы ансамблевого прогноза предоставляют большое количество выходной продукции. Основная ее привлекательность – возможность априорно оценить меру доверия к прогнозу, увидеть различные сценарии развития событий, получить вероятностную информацию. Кроме того, средние по ансамблю прогнозы обычно оказываются лучшего качества, чем прогнозы детерминированные.

В то же время за счет большого объема ансамблевой продукции, ее трудно анализировать без использования специально разработанных форм ее представления и последующей обработки полученных результатов (ансамблевого постпроцессинга).

Ниже перечислены виды ансамблевой продукции, подготавливаемой и предоставляемой на сайте. Автоматизированная оперативная визуализация проводится с использованием пакета Изограф [1].

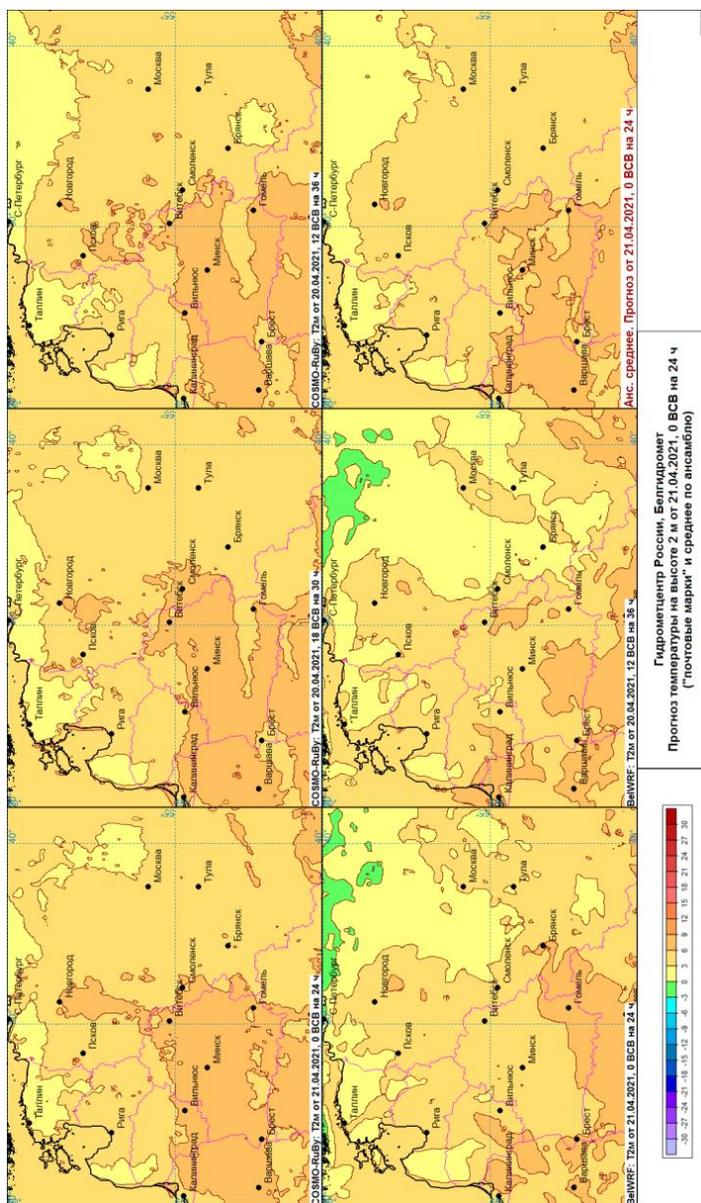
Карты «почтовых марок» («Postage stamps»). Все прогнозы ансамбля, представленные на одной карте. Дополнительно на таких картах добавлено поле среднего по ансамблю. Для каждой прогностической реализации ансамбля на этикетках внизу карт приводится название использованной модели, начальный срок детерминированного прогноза и заблаговременность этого прогноза.

При отсутствии некоторых прогностических реализаций ансамбля, возникающих иногда из-за недостаточной стабильности удаленной передачи данных между прогностическими центрами, на соответствующей панели выводится информация об отсутствии данных, а средние поля рассчитываются с использованием меньшего размера ансамбля. Карты в формате «почтовых марок» дают возможность увидеть различные вероятные сценарии развития метеорологических процессов. При составлении прогноза прогнозистам рекомендуется первоначально с помощью этих карт определить, до какой заблаговременности все прогнозы ансамбля близки друг к другу, а затем рассмотреть возможные (альтернативные) варианты последующего развития метеорологических процессов.

Карты в формате «почтовых марок» предоставляются для температуры на уровне 2 м, накопленных за 6 и за 12 ч осадков, порывов ветра на уровне 10 м за час, предшествующий моменту прогноза. Шаг по заблаговременности составляет 6 часов. Пример прогностических карт в форме «почтовых марок» показан на рис. 7.

Карты вероятностей. Вероятности в ансамблевых системах определяются как число прогнозов ансамбля, в которых событие наблюдалось, деленное на размер ансамбля. Например, если 5 из 10 прогнозов ансамбля дают осадки выше 20 мм в сутки, мы можем сказать, что вероятность выпадения за сутки более 20 мм осадков составляет 50 %.

Карты вероятностей предоставляются для событий «суммарные осадки за 12 часов более 1, 10, 20, 50 мм», «порывы скорости ветра на уровне 10 м более 5, 10, 15, 25 м/с». Пример таких карт приведен на рис. 8.



а)

Рис. 7. Пример карт ансамблевого прогноза от 21.04.2021 г., 00 ч ВСВ на 24 ч. «Почтовые марки» и средние по ансамблю для температуры на высоте 2 м (а), 12-часовых сумм осадков (б). В верхнем ряду – лагированные прогнозы COSMO-RuV, в нижнем – WRF, в среднем правом углу – средние по всем реализациям.

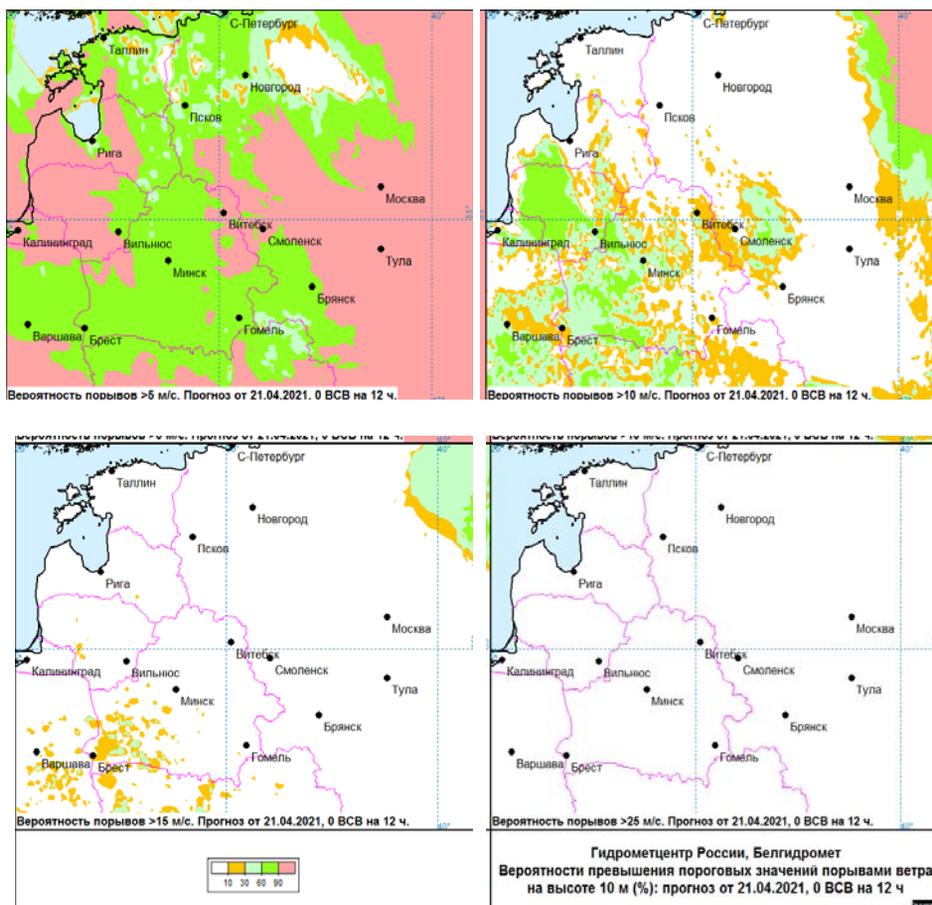


Рис. 8. Пример карт вероятностей превышения пороговых величин для порывов ветра на высоте 10 м.

Fig. 8. Example of ensemble forecast (probability maps) for gusts with thresholds 5 m/s (a), 10 m/s (б), 15 m/s (в), 25 m/s (г).

Так, 21 апреля днем в юго-западной части Республики Беларусь прогнозировалась вероятность свыше 60–90 % усиления ветра более 5 м/с, 30–60 % – более 10 м/с, 15–30 % – свыше 15 м/с только в районе Бреста. В результате в аэропорту Бреста были зарегистрированы порывы 10–11 м/с, в Минске – 7–8 м/с.

Учитывая локальность явлений, можно предположить о существовании более сильных порывов ветра в окрестностях указанных метеостанций. Информация о существовании подобных угроз важна для прогнозистов.

3.2.2. Технология комплексной статистической коррекции с применением техник машинного обучения

В Гидрометцентре России была разработана система комплексной статистической коррекции прогнозов метеопараметров в пунктах с применением машинного обучения на основе нейронных сетей. Идея заключается в коррекции первоначальных модельных прогнозов, проинтерполированных в пункты (в которых проводятся метеорологические наблюдения), с использованием данных измерений за предыдущие 35 дней (длина периода выбрана экспериментально), и получении результирующего объединенного продукта.

Применение подходов машинного обучения в настоящее время все активнее используется для коррекции результатов модельных вычислений с учетом ошибок предшествующих прогнозов, учета местных особенностей, пространственной изменчивости прогнозируемых параметров. Эффективность данных методик коррекции повышается при использовании численных прогнозов различных прогностических систем.

Для обучения и тестирования технологии постпроцессинга на основе машинного обучения, используемой для прогнозов приземных метеозаэlements [2] (далее технология Post-RuBy), необходимо иметь архив этих прогнозов за период не менее года. Такой архив прогнозов по Рабочей версии WRF-ARW Белгидромета отсутствовал. Поэтому для отработки технологических аспектов обучения использовались архивы прогнозов моделей COSMO-RuBy и COSMO-RuENA6 за 2019–2020 гг. Затем (после обучения) полученные алгоритмы коррекции были применены для расчетов совместной прогностической продукции на базе моделей COSMO-RuBy и модели WRF-ARW.

Архитектура (порядок блоков) нейронной сети для коррекции прогнозов температуры и точки росы приведена в табл. 4. Для коррекции характеристик ветра (порывов и фоновых значений) использовались аналогичные нейронные сети, но с размерностью выхода, равной 3. При оптимизации параметров нейронных сетей использовалась функция потерь Хьюбера, вычисление градиентов ошибки осуществлялось методом обратного распространения ошибки [8], а оптимизация весов – согласно методу Adam [7].

Примеры графиков оценок в период 1 мая – 31 августа 2021 г. показаны на рис. 9. Видно, что за рассмотренный теплый период прогнозы температуры воздуха и точки росы на высоте 2 м в дневное время в среднем точнее у модели WRF, а в ночное время – у модели COSMO-RuBy. Прогнозы скорости ветра на высоте 10 м оказались точнее у модели COSMO-RuBy для всех заблаговременностей, а давления, приведенного к уровню моря – для всех заблаговременностей, за исключением 12 и 15 ч.

Таблица 4. Аргументы нейронной сети и количество ее параметров при различных заблаговременностях прогноза
Table 4. Arguments of the neural network and the number of its parameters for different forecast times

Заблаговременность, часы	Сдвиги по начальному сроку и заблаговременности (Δt , $\Delta \tau$), часы	Всего аргументов (предикторов)	Всего параметров нейронной сети
6	(0, -6), (0, -3), (0, 0), (0, 3), (0, 6), (12, 6), (12, 12), (12, 18), (24, 18), (24, 24), (24, 30), (24, -6), (24, 0), (24, 6), (36, 30), (36, 36), (36, 42)	123	5210
9, 12, 15, 18	(0, -6), (0, -3), (0, 0), (0, 3), (0, 6), (12, 6), (12, 12), (12, 18), (24, 18), (24, 24), (24, 30), (24, -6), (24, 0), (24, 6)	102	4706
21, 24, 27, 30	(0, -6), (0, -3), (0, 0), (0, 3), (0, 6), (12, 6), (12, 12), (12, 18), (24, -6), (24, 0), (24, 6)	81	4202
33, 36, 39, 42	(0, -6), (0, -3), (0, 0), (0, 3), (0, 6), (24, -6), (24, 0), (24, 6)	60	3698
0, 3, 45, 48	(0, 0), (24, 0)	30	3338

Комплексифицированный с применением техник машинного обучения прогноз (технология Post-RuBy) с использованием обеих моделей (COSMO-RuBy и WRF-ARW) показал наилучшие результаты, близкие по качеству к прогнозам наилучшей из исходных моделей. Коррекция с использованием только прогнозов COSMO-RuBy (технология COSMO-RuBy+ML) для всех заблаговременностей и метеорологических параметров оказалась хуже комплексифицированного прогноза: для температуры воздуха на $0.08 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.02 \text{ }^\circ\text{C}$ (95% уровень статистической значимости оценен методом бутстрэп), для точки росы на $0,07 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.02 \text{ }^\circ\text{C}$, для давления на уровне моря на $0.05 \text{ гПа} \pm 0.01 \text{ гПа}$, для скорости ветра на $0.03 \text{ м/с} \pm 0.01 \text{ м/с}$.

Таким образом, комплексирование продукции моделей COSMO-RuBy и WRF-ARW с использованием технологии машинного обучения позволило уменьшить ошибки краткосрочного (до 2 суток) прогнозирования приземной температуры воздуха и точки росы до $1,7^\circ\text{C}$ в теплый период и до $2.2 \text{ }^\circ\text{C}$ в феврале, скорости ветра до $0,9 \text{ м/с}$, давления на уровне моря до $1,2 \text{ гПа}$. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности внедрения и использования методики комплексирования прогностической продукции моделей COSMO-RuBy (Росгидромет) и WRF (Белгидромет).

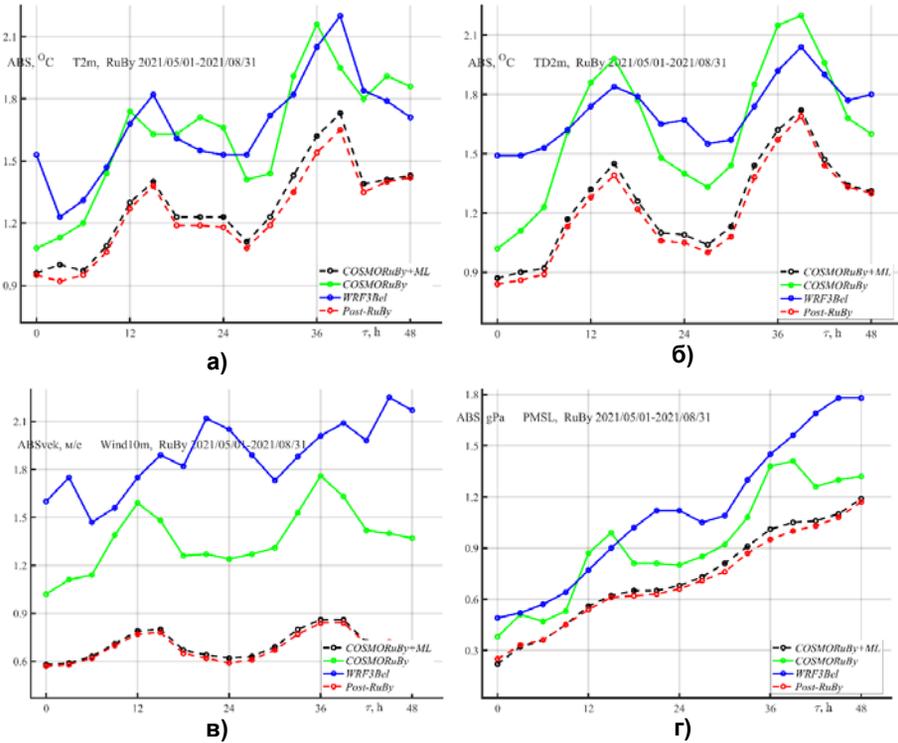


Рис. 9. Средние абсолютные погрешности прогнозов на территории ЕТР и Республики Беларусь. По осям: x – заблаговременности прогнозов; y – средняя абсолютная ошибка прогнозов: температуры воздуха на высоте 2 м (а); точки росы на высоте 2 м (б); вектора скорости ветра на высоте 10 м (в); давления на уровне моря (г). Зеленые линии: COSMO-RuBy; синие линии: WRF-ARW; красный пунктир: результат комплексирования и машинного обучения (технология Post-RuBy). черный пунктир: прогнозы COSMO-RuBy (только) откорректированные методом машинного обучения.

Fig. 9. Average absolute errors of forecasts on the territory of the European part of Russia and on the territory of Belarus in the period 01.05-31.08.2021. Axes: X forecast lead times; Y average absolute forecast errors of T2m (а); Td2m (б); wind speed vectors at a height of 10 m (в); sea level pressure (г). Green lines: COSMO-RuBy; blue lines: WRF-ARW; red dotted lines: the result of Post-RuBy technology; black dotted lines: COSMO-RuBy (only) forecasts corrected with using machine learning methods.

Заключение

В Гидрометцентре России в интересах метеослужб Союзного государства в рамках технологии COSMO-Ru реализована система регионального краткосрочного численного прогноза погоды COSMO-RuBy с шагом вычислительной сетки 2.2 км (с использованием в качестве ядра модели

COSMO одноименного консорциума). Для удобного представления результатов (карт, метеограмм, аэрологических диаграмм) разработан и функционирует специализированный сайт, на котором реализовано 2-оконное представление информации.

В ходе совместных работ специалистов Гидрометцентра России и Белгидромета был решен ряд методических вопросов по представлению численной продукции для более полной интерпретации Вычисления COSMO-RuBy и обновление информации на сайте производится четыре раза в сутки.

В Белгидромете реализована система численного краткосрочного регионального прогноза погоды WRF-ARW с шагом вычислительной сетки 3 км. Вычисления и обновление предоставляемой синоптикам информации производятся дважды в сутки.

Реализован обмен унифицированной цифровой продукцией COSMO-RuBy и WRF-ARW между Гидрометцентром России (продукция COSMO-RuBy) и Белгидрометом (продукция WRF-ARW) через сервер ГВЦ Росгидромета в коде GRIB1 для унифицированной широтно-долготной сетки с шагом 0.025° (ориентировочным объемом 4 Гб в сутки).

В Белгидромете осуществляется визуализация прогностических данных моделей COSMO-RuBy и WRF для территории Республики Беларусь и сопредельных областей Российской Федерации в виде карт, таблиц, графиков с использованием АРМ синоптика-прогнозиста, а также производится сравнительный оперативный мониторинг успешности прогнозов.

В Гидрометцентре России созданы две технологии для получения комплексного прогностического продукта: ансамблевый лагированный прогноз, предоставляющий пользователям совокупность вероятностных характеристик, и система комплексной коррекции на основе машинного обучения. Объединенные продукты позволяют синоптикам дополнить прогнозы, полученные в каждой из стран, уточненными данными и характеристиками предсказуемости ожидаемых в ближайшие 36 часов погодных процессов.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 05.09.2017 года № 169-ОК-Б/091701.

Список литературы

1. Алферов Ю.В., Копейкин В.В. Аспекты автоматизации в гидрометеорологической системе визуализации Isograph // Труды Гидрометцентра России. 2011. Вып. 346. С. 17-22.
2. Быков Ф.Л. Статистическая коррекция прогнозов погоды по модели COSMO с помощью нейронных сетей // Метеорология и гидрология. 2020. № 3. С. 5-20.
3. Степанов Ю.А., Жабина И.И., Пурина И.Э., Недачина А.Ю., Елисеев Г.В. Автоматизированная технология Гидрометцентра России для оперативной обработки информации в высокопроизводительной кластерной инфраструктуре // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 257-285.

4. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М., Алферов Д.Ю., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Казакова Е.В., Кирсанов А.А., Никитин М.А., Перов В.Л., Суркова Г.В., Ревокатова А.П., Шатунова М.В., Чумаков М.М. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации и развития // *Метеорология и гидрология*. 2015. № 6. С. 58-70.

5. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Шатунова М.В., Чубарова Н.Е., Алферов Д.Ю., Варенцов М.И., Захарченко Д.И., Копейкин В.В., Никитин М.А., Полохов А.А., Ревокатова А.П., Татаринovich Е.В., Чурюлин Е.В. Система краткосрочного численного прогноза высокой детализации COSMO-Ru, ее развитие и приложения // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2019. № 4 (374). С. 37-53.

6. Bengtsson L.K., Magnusson L., Källén E. Independent Estimations of the Asymptotic Variability in an Ensemble Forecast System // *Mon. Wea. Rev.* 2008. Vol. 136, is. 11. P. 4105-4112. DOI:<https://doi.org/10.1175/2008MWR2526.1>

7. Dozat T. Incorporating Nesterov Momentum into Adam // *ICLR Workshop*. 2016. Vol. 1. P. 2013-2016.

8. Galushkin A.I. *Neural network theory*, Springer, 2007. 402 p.

9. Kalnay E. Historical perspective: earlier ensembles and forecasting forecast skill // *Q J R Meteorol Soc.* 2019. Vol. 145 (Suppl. 1). P. 25-34. <https://doi.org/10.1002/qj.3595>

References

1. Alferov Yu.V., Kopeikin V.V. Aspects of automation in the hydrometeorological visualization system Isograph. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2011, vol. 346, pp. 17-22 [in Russ.].

2. Bykov F.L. Statistical Correction of the COSMO Model Weather Forecasts Based on Neural Networks. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, no. 3, pp. 141–152. DOI: 10.3103/S1068373920030012.

3. Stepanov Yu.A., Zhabina I.I., Purina I.E., Nedachina A.Yu., Eliseev G.V. Automated technology of the Hydrometeorological Center of Russia for operational information processing in a high-performance cluster infrastructure. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 374, no. 4, pp. 257-285 [in Russ.].

4. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Vil'fand R.M., Alferov D.Yu., Astakhova E.D., Blinov D.V., Bundel' A.Yu., Kazakova E. V., Kirsanov A.A., Nikitin M.A., Perov V.L., Surkova G.V., Revokatova A.P., Shatunova M.V., Chumakov M.M. The COSMO-Ru system of nonhydrostatic mesoscale short-range weather forecasting of the Hydrometcenter of Russia: The second stage of implementation and development. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, no. 6, pp. 400–410. DOI: 10.3103/S1068373915060060.

5. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Astakhova E.D., Blinov D.V., Bundel' A.Yu., Kirsanov A.A., Shatunova M.V., Chubarova N.Ye., Alferov D.Yu., Varentsov M.I., Zakharchenko D.I., Kopeikin V.V., Nikitin M.A., Poliukhov A.A., Revokatova A.P., Tatarinovich E.V., Churiulin E.V. COSMO-Ru high-resolution short-range numerical weather prediction system: its development and applications. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 374, no. 4, pp. 37-53 [in Russ.].

6. Bengtsson L.K., Magnusson L., Källén E. Independent Estimations of the Asymptotic Variability in an Ensemble Forecast System. *Mon. Wea. Rev.*, 2008, vol. 136, no. 11, pp. 4105-4112. DOI: 10.1175/2008MWR2526.1.

7. Dozat T. Incorporating Nesterov Momentum into Adam. ICLR Workshop, 2016, vol. 1, pp. 2013-2016.

8. Galushkin A.I. Neural network theory. Springer, 2007. 402 p. [in Russ.].

9. Kalnay E. Historical perspective: earlier ensembles and forecasting forecast skill. *Q J R Meteorol Soc.*, 2019, vol. 145 (Suppl. 1), pp. 25-34. DOI: 10.1002/qj.3595.

*Поступила 25.10.2021; одобрена после рецензирования 30.11.2021;
принята в печать 13.12.2021.*

*Submitted 25.10.2021; approved after reviewing 30.11.2021;
accepted for publication 13.12.2021.*