

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-2-6-34>

УДК 551.578.9

## **Конфигурация COSMO-Ru2Bu модели COSMO: успешность и методология оценки численных прогнозов $\beta$ - и $\gamma$ -мезомасштабных атмосферных процессов**

***И.А. Розинкина, Г.С. Ривин, А.Н. Багров, Д.В. Блинов,  
Ф.Л. Быков, Д.В. Васькова, Д.И. Захарченко, А.Ю. Бундель,  
Е.В. Воробьева, А.А. Кирсанов, А.А. Полюхов,  
М.В. Шатунова, Ю.О. Шувалова, Г.В. Елисеев***

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия  
inna.rozinkina@mail.ru*

Приведено краткое описание конфигурации COSMO-Ru2Bu (шаг сетки 2,2 км) модели COSMO, обеспечивающей выпуск численных прогнозов погоды до 48 часов для регионов Европейской территории России и Республики Беларусь, методология и результаты оценки точности этих прогнозов. COSMO-Ru2Bu реализована в Гидрометцентре России, функционирует в системе оперативного регионального численного прогноза погоды COSMO-Ru на суперкомпьютере CRAY XC40-LC.

Особенностями COSMO-Ru2Bu являются: обширный домен с шагом сетки, позволяющим явно описывать крупные (высотой свыше 5–6 км) конвективные движения, а также учитывать особенности рельефа; 2) «встроенная» технология усвоения данных доплеровских метеорологических радиолокаторов, позволяющая получать более точные прогнозы быстроразвивающихся опасных явлений на ближайшие часы; 3) «встроенная» система визуализации большого количества карт по различным регионам с каскадным повышением детализации изображений.

Оперативные испытания 2020–2021 гг. выявили высокий уровень успешности прогнозов базовых метеопараметров у земной поверхности. Для сравнения с прогнозами по мезомасштабным моделям более грубого разрешения (например, конфигурации COSMO-Ru6ENA, шаг сетки 6,6 км) процессов с высокой пространственно-временной изменчивостью (порывов ветра, часовых сумм осадков, погодных характеристик в горных областях и т. д.) понадобилось расширение стандартных для оперативных испытаний подходов и критериев: оценивание по географически однородным областям, использование специальных оценок редких событий, сравнение с радарной информацией.

*Ключевые слова:* численный прогноз погоды, мезомасштабное атмосферное моделирование, усвоение радарных данных, оценка прогнозов погоды, негидростатическая модель атмосферы

## The COSMO-Ru2By configuration of the COSMO model: skill and methodology for estimating of the forecasts of $\beta$ - and $\gamma$ -mesoscale processes

*I.A. Rozinkina, G.S. Rivin, A.N. Bagrov, D.V. Blinov,  
F.L. Bykov, D.V. Vaskova, D.I. Zakharchenko, A.Yu. Bundel,  
E.V. Vorobyeva, A.A. Kirsanov, A.A. Polyukhov,  
M.V. Shatunova, Yu.O. Shuvalova, G.V. Eliseev*

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia  
inna.rozinkina@mail.ru*

The paper gives a brief description of the COSMO-Ru2By configuration (the grid spacing is 2.2 km) of the COSMO model, which provides numerical weather forecasts for up to 48 hours for the European part of Russia and for the Republic of Belarus, as well the methodology and results of skill of these forecasts. The COSMO-Ru2By was realized in the Hydrometcentre of Russia and operates as an element of the COSMO-Ru operational limited-area numerical weather prediction system on the CRAY XC40-LC supercomputer.

The features of the COSMO-Ru2By are: 1) a vast calculation domain with a grid spacing that allows an explicit description of large (over 5-6 km high) convective motions and considering in detail the features of terrain; 2) the “embedded” technology for assimilation of DMRL-C Doppler weather radar data providing more accurate forecasts of rapidly developing weather processes for the next few hours; 3) coupled visualization system providing a great number of maps for different regions with a cascade image detailing. Operational trials in 2020-2021 showed a high skill of forecasts of the basic weather parameters with the COSMO-Ru2By. For comparison with forecasts of highly variable weather parameters (wind gusts, hourly precipitation, parameters in mountain areas, etc.) based on mesoscale models with lower resolution (e.g., COSMO-Ru6ENA, the grid size is 6.6 km), it was proposed to apply expanded trial approaches and criteria: e.g., the estimation over geographically homogeneous areas, the use of special criteria for predicting rare events, the comparison with radar data.

*Keywords:* numerical weather prediction, mesoscale atmospheric modeling, radar data assimilation, weather forecast skill estimation, non-hydrostatic atmosphere models

### Введение

В ФГБУ «Гидрометцентр России» в течение 2018–2021 гг. в рамках НИР «Повышение качества гидрометеорологических прогнозов и обнаружения опасных гидрометеорологических явлений» (шифр ПП-10-2017/02/22-1, государственный контракт от 05.09.2017 года № 169-ОК-Б/091701 Программы по Гидрометеорологии Союзного государства) была разработана, испытана и апробирована новая конфигурация COSMO-Ru2By модели COSMO [17, 23] с шагом вычислительной сетки 2,2 км и областью вычислений, включающей Республику Беларусь, Европейскую территорию России (ЕТР) и прилегающие регионы [15, 16]. COSMO-Ru2By предназначена для выпуска краткосрочных численных прогнозов на сетке 2,2 км, разрешающей крупную, так называемую проникающую конвекцию высотой свыше 5–6 км. Максимальная заблаговременность

прогнозов такой детализации, по опыту зарубежных стран, целесообразно до 48 часов. Вычислительная область COSMO-Ru2By является одной из наиболее крупных областей вычислений в мире среди конфигураций региональных моделей с шагами первых километров (разрешение  $\beta$ - и  $\gamma$ -мезомасштабных атмосферных процессов). В вычисления по COSMO-Ru2By впервые в отечественной практике мезомасштабного численного прогноза были включены такие технологические и информационные элементы, как усвоение радарной информации методом «Nudging», использование новых данных аэрозольной климатологии, применение диагностических индексов конвективных процессов.

Настоящая статья посвящена описанию и анализу работы COSMO-Ru2By, главным образом по расчетам совокупности параметров успешности для периодов времени, для которых проводились оперативные испытания данной конфигурации с сентября 2020 г. по сентябрь 2021 года и последующего мониторинга успешности.

Использование в негидростатической модели шагов сетки, разрешающих крупные конвективные движения, позволяет прогнозировать вертикальные профили метеопараметров точнее, чем у более «грубых» моделей без параметризации глубокой конвекции, и, следовательно, угрозы опасных конвективных явлений, в частности с применением так называемых конвективных индексов. Для выявления реальной потребительской ценности численных прогнозов погоды (ЧПП) были применены расширенные подходы: оценивание по географически однородным областям и типам преобладающих погодных процессов, использование специальных оценок редких событий, привлечение радарной информации, с учетом воспроизведения моделью проявлений конвективной неустойчивости в виде локальных сильных ливней, порывов ветра и т. п., априори носящих стохастический характер, при сравнении с другими моделями более грубого разрешения (например, конфигурацией COSMO-Ru6ENA, шаг сетки 6,6 км).

## **1. Особенности технологической системы COSMO-Ru2Ru и ее продукции**

### **1.1. Версия системы COSMO-Ru, реализованная на суперкомпьютере CRAY XC40-LC**

В настоящее время на суперкомпьютере CRAY XC40-LC функционирует система оперативного регионального численного прогноза погоды COSMO-Ru, в которую включена конфигурация COSMO-Ru2By. Предшественником этой системы была одноименная технологическая линия [2, 10] с конфигурациями модели COSMO с шагами сеток от 13,2 до 1,1 км:

COSMO-Ru13ENA → COSMO-Ru7 →  
→ COSMO-Ru2(CFO/VFO/SFO) → COSMO-Ru1(Sochi/Krasnoyarsk).

Данная система до 2022 г. выпускала прогнозы для различных территорий и сеток с шагом 13,2 км (COSMO-Ru13ENA для всей территории России и прилегающих регионов), 7 км (COSMO-Ru7 для ЕТР, Урала и прилегающих регионов), три конфигурации с шагом 2,2 км (COSMO-Ru2CFO для Центрального федерального округа (ЦФО), COSMO-Ru2YFO для региона Северного Кавказа и COSMO-Ru2VFO для Центрального Поволжья) и в экспериментальном режиме для горных районов проведения крупных спортивных мероприятий в районе Сочи и Красноярска (Ru1, с шагом сетки 1,1 км).

Перечисленные конфигурации (за исключением экспериментальных 1-километровых версий) в 2009–2016 гг. прошли ряд оперативных испытаний и впоследствии активно использовались в прогностических центрах Росгидромета как важный информационный ресурс для составления сверхкраткосрочных и краткосрочных прогнозов погоды [8–10].

С вводом в эксплуатацию суперкомпьютера CRAY XC40-LC с 2017 г. в Гидрометцентре России начала развиваться обновленная система COSMO-Ru, включившая в себя конфигурацию COSMO-Ru6ENA (шаг сетки 6,6 км) для всей территории России и прилегающих регионов, с территорией, совпадающей с ранее внедренной COSMO-Ru13ENA (шаг сетки 13,2 км) и заменившей ее в 2022 г., а также конфигурацию COSMO-Ru2By (шаг сетки 2,2 км), в которую впоследствии были включены экспериментальные конфигурации с шагом 1 км для Московского региона [11, 12] и региона Сочи. Домен COSMO-Ru2By был выбран весьма обширный, объединивший области вычислений всех ранее внедренных конфигураций с шагом сетки 2,2 км и расширенный на запад – в свете заинтересованности прогностической деятельности Республики Беларусь.

Информация на границах и начальные поля для конфигураций COSMO-Ru13ENA и COSMO-Ru6ENA ранее поступали в Росгидромет из системы глобального моделирования ICON Немецкой службы погоды в соответствии с уставом Консорциума COSMO, а с марта 2022 года – из доступных открытых источников результатов моделирования ICON [14, 22].

В рамках этих работ на суперкомпьютере Cray XC40-LC большое внимание было уделено повышению эффективности распараллеливания вычислительных процессов [2, 13, 14]. Кроме того, в период сравнительного анализа 2020–2021 гг. обе конфигурации имели в своей основе последнюю версию модели COSMO v.6 одноименного консорциума [23] с использованием обновленных модулей физических параметризаций, настроек, внешних параметров и новых международных архивов свойств подстилающей поверхности высокой детализации.

Поскольку минимальный масштаб атмосферных процессов, прогнозируемый моделью атмосферы (так называемое разрешение модели), равен примерно 7–10 шагам сетки, то переход для самого крупного домена

от шага сетки 13,2 км (COSMO-Ru13ENA) к шагу 6,6 км (COSMO-Ru6ENA) позволил повысить разрешение модельных атмосферных процессов для всей России формально с 92–132 км до 46–66 км (ориентировочно от 100 до 50 км). В то же время по COSMO-Ru2By (шаг 2,2 км) масштаб явно воспроизводимых атмосферных движений для Республики Беларусь и всей Европейской территории России составил приблизительно 15–20 км. Отметим, что, следуя ряду признанных классификаций мезомасштабных процессов, рассмотренных, например, в [3, 21], наименьшие циркуляции, которые могут быть воспроизведены COSMO-Ru6ENA, относятся к категории  $\beta$ -масштаба (20–200 км, период жизни 1 час – 1 сутки), соответственно, по COSMO-Ru2By – к верхней части категории  $\gamma$ -масштаба (2–20 км, период жизни порядка первых часов). То есть именно COSMO-Ru2By может воспроизвести атмосферные процессы высокой пространственно-временной изменчивости, способные вызвать опасные явления конвективной природы.

Согласно решению ЦМКП от 11.03.2021 [<http://method.meteorf.ru/>], на основе результатов оперативных испытаний, проведенных в 2020–2021 гг., система COSMO-Ru2By рекомендована в качестве основного метода численного краткосрочного прогноза погоды для прогностических организаций Росгидромета (наряду с COSMO-Ru6ENA как дополняющая и уточняющая ее), а оперативный счет по ряду конфигураций, функционирующих в рамках предшествующей системы COSMO-Ru, приостановлен. При проведении данных испытаний и при последующем мониторинге качества для выявления уровня успешности конфигурации COSMO-Ru2By были использованы расширенные приемы верификации, в частности, с привлечением информации в окрестностях точек наблюдений, радарных данных и использование специальных критериев успешности дихтомных прогнозов редких событий (например, [4, 5]).

## 1.2. Технологический комплекс COSMO-Ru2By

COSMO-Ru2By включает в себя блоки усвоения данных, моделирования, подготовки визуализированной продукции. Параллельно работает блок статистической коррекции прогнозов для пунктов, результаты которого, наряду с результатами первоначального моделирования [1], отображаются на метеограммах. По результатам вычислений COSMO-Ru2By формируется цифровая продукция в кодировке GRIB1, передаваемая для дальнейшего использования в Белгидромет; большинство пользователей Росгидромета использует совокупность прогностических карт и метеограмм в графических форматах, формируемых в самом технологическом процессе по мере счета модели и доступных через специализированные веб-сайты.

Для своей работы COSMO-Ru2By использует информацию на границах и начальные поля из COSMO-Ru6ENA. Вычисления производятся параллельно, с небольшим сдвигом времени старта COSMO-Ru2By относительно COSMO-Ru6ENA.

Прогнозы вычисляются по начальным данным от 00, 06, 12 и 18 ч ВСВ. Все прогнозы системы COSMO-Ru до своих максимальных заблаговременностей готовы через 1,5–2 ч после начала счета от соответствующего срока наблюдений (менее чем через 5 ч после срока наблюдений), что свидетельствует об информационно-вычислительной эффективности технологии и выполнении требований лимитов времени вычисления оперативных численных прогнозов (например, все прогнозы COSMO-Ru по начальному сроку 00 ч ВСВ готовы для использования в визуализированном виде до 05 ч ВСВ, или 08 ч МСК).

В COSMO-Ru2By были выполнены модификации в сравнении с другими компонентами COSMO-Ru:

1) внедрены новые базы климатического содержания аэрозолей, содержащие существенно более подробные современные данные о пространственном распределении аэрозолей [7];

2) подобраны параметры оптимального использования вычислительных мощностей суперкомпьютерной техники для получения результатов с наименьшими временными затратами [13];

3) включены алгоритмы усвоения данных синоптических и аэрологических метеорологических наблюдений по методу «Nudging» («Подталкивание»);

4) включены алгоритмы усвоения данных доплеровских метеорологических локаторов (ДМРЛ-С), размещенных на территории Республики Беларусь и ЕТР, по методу LHN – «Latent heat Nudging» («Подталкивания скрытой теплоты») [19, 20];

5) включен расчет диагностических индексов – индексов угроз подсеточных опасных и неблагоприятных явлений конвективной природы [15];

6) выполнена унификация выходной продукции в кодовой форме GRIB с продукцией численного прогноза, выпускаемой в Белгидромете на базе модели WRF с шагом 3 км для обмена результатами негидростатического моделирования, реализована первая в России система краткосрочного регионального ансамблевого ЧПП на конвективно-разрешающих сетках [16];

7) реализован метод коррекции выходных данных моделирования с использованием машинного обучения [1] продукции COSMO-Ru2By и WRF Белгидромета с включением в технологию визуализации метеограмм.

Включение новых, перечисленных выше модулей, сопровождалось детальным анализом эффектов от произведенных модификаций.

Основные характеристики системы приведены в табл. 1. В связи с различными режимами работы элементов технологии COSMO-Ru2By, связанными с усвоением данных, которые будут рассмотрены в следующем подразделе, ее функционирование может быть организовано в двух временных режимах (более поздний вариант в таблице помечен звездочкой).

**Таблица 1.** Параметры компонент системы COSMO-Ru на ЭВМ CRAY XC40-LC: COSMO-Ru6ENA и COSMO-Ru2By

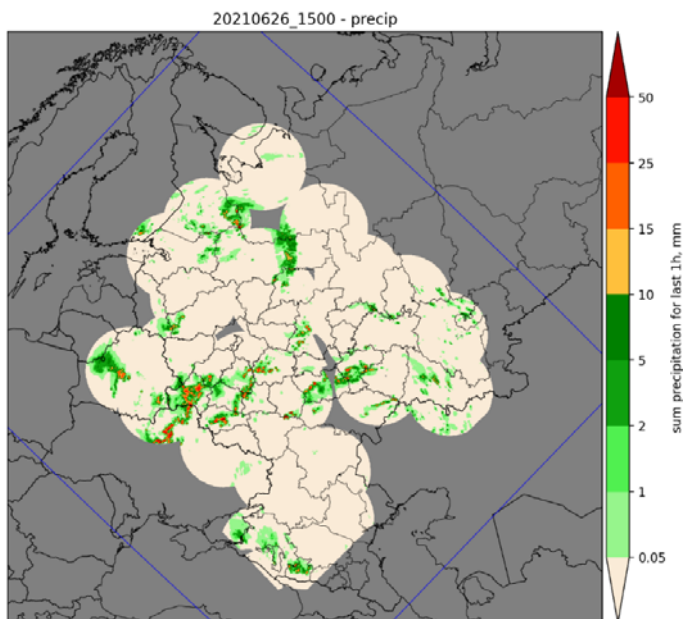
**Table 1.** The parameters of components COSMO-Ru6ENA and COSMO-Ru2By of COSMO-Ru system on the CRAY XC40-LC

Основные параметры системы	COSMO-Ru6ENA	COSMO-Ru2By
Регион	Северная Евразия	ЕТР, Республика Беларусь, прилегающие регионы
Шаг расчетной сетки, км	6,6	2,2
Источник начальных данных	Глобальная модель ICON	COSMO-Ru6ENA, наблюдения
Граничные условия	Глобальная модель ICON	COSMO-Ru6ENA
Шаг по времени, с	50	20
Количество узлов сетки (X×Y)	2000×1000	1200×1400
Размер области счета, км	11542×6632	1751×2033
Количество уровней	40	50
Сроки начальных данных, ВСВ	00, 06, 12, 18	
Максимальная заблаговременность прогнозов, ч	120 (00,12) / 78 (06,18)	48
Количество используемых вычислительных ядер	1944	2880
Время счета, мин	80 (00,12) / 50 (06,18)	65
Время начала счета, ч.мин ВСВ	2.55	3.15*/1.20
Время готовности результатов счета последней заблаговременности (до визуализации), ч.мин ВСВ	4.15 (00,12) / 3.45 (06,18)	2.25

### 1.3. Усвоение данных по методам Nudging и Latent heat Nudging в COSMO-Ru2By

Важным отличительным элементом разработанной конфигурации COSMO-Ru2By является включение в систему блоков усвоения данных по типу «Nudging» («Подталкивание») [13], основанных на различных алгоритмах для усвоения данных контактных измерений (синоптических станций и аэрологических наблюдений) и наблюдений ДМРЛ-С. Суть методики Nudging заключается в коррекции процесса моделирования на ранних стадиях прогноза, когда, стартовав по данным трехмерного анализа данных, полученного в рамках глобальной системы усвоения, модель, «догоняя» реальное время, может «доусваивать» новые результаты измерений, внося поправки в правые части дифференциальных уравнений гидротермодинамики в соответствии с выявляемыми отклонениями прогностических модельных данных и измеренных величин.

Важным свойством конфигурации COSMO-Ru2By является усвоение данных ДМРЛ-С с обширной территории, в том числе размещенных на территории Республики Беларусь (в Витебске, Гомеле и Минске). Результаты радарного композита (с шагом 1 км) для всей территории формируются в Центральной аэрологической обсерватории и Гидрометцентре России [4, 6]. Области вычислений COSMO-Ru2By и доступных данных ДМРЛ-С показана на рис. 1.



**Рис. 1.** Области вычислений COSMO-Ru2By (синий контур) и композита радарных данных (круги светлого фона). Цветовой шкалой выделены области осадков. (Пример для 26 июня 2021 года).

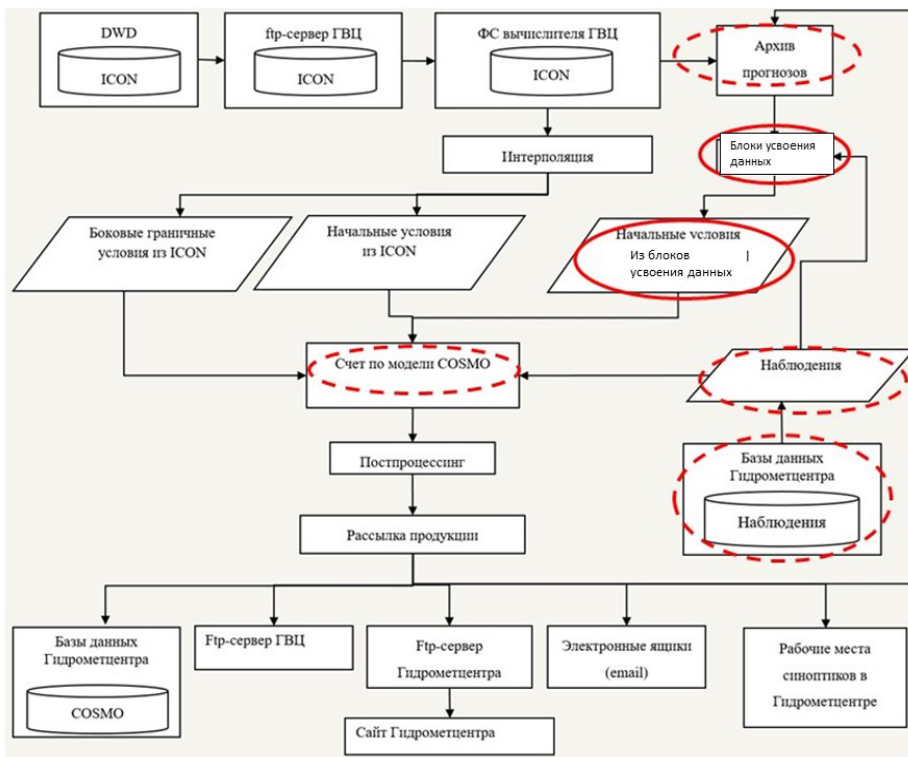
**Fig. 1.** Domains of COSMO-Ru2By (blue outline) and of radar data (light circles). The color scale highlights areas of precipitation. (Example for June 26, 2021).

Включение блоков усвоения, настроенных на поступление данных на основе информационно-технологической инфраструктуры Гидрометцентра России, потребовало модификации целого ряда модулей и компонент информационного сопровождения COSMO-Ru2By (рис. 2).

Продукция COSMO-Ru2By в цифровом (формат GRIB1), текстовом (таблицы метеограмм) и графическом виде (карты, метеограммы) в оперативном режиме готова к срокам выпуска прогнозов погоды в прогностических центрах Росгидромета на ЕТР и в Белгидромете (во время испытаний готовность продукции на сайте по сроку 00 ч ВСВ к 05 ч ВСВ была в 94 % случаев прогноза). Помимо этого, в экспериментальном режиме по промежуточным синоптическим срокам (03, 09, 15 и 21 ч ВСВ)



рассчитываются прогнозы на основе усвоения методом Nudging заблаговременностью до 18 часов (на основе полей первого приближения 3-х и 6-часовых прогнозов COSMO-Ru6ENA, без использования начальных данных глобальной системы усвоения ICON за указанные сроки).



**Рис. 2.** Технологическая схема функционирования COSMO-Ru2By. Красными овалами показаны процессы, модифицированные при введении блоков усвоения данных.

**Fig. 2.** Technological scheme of the COSMO-Ru2By. Red ovals shows the processes modified with the introduction of data assimilation modules.

Таким образом, система может работать в двух режимах – стандартном (в табл. 1 временные характеристики помечены звездочкой), т. е. при каскадном получении данных за начальный срок (результаты глобальной системы усвоения ICON → интерполяция на сетку COSMO-Ru6ENA → интерполяция на сетку COSMO-Ru2By → использование результатов на границах области счета по COSMO-Ru6ENA «синхронной» заблаговременности), либо в экспериментальном, когда старт COSMO-Ru2By производится от прогностических (на 3 или 6 ч) полей COSMO-Ru6ENA (стартовавшей по данным глобальной системы усвоения (СУД) ICON за предшествующий срок) с последующим Nudging усвоением всех

поступающих данных вплоть до стартового срока прогноза. В этом случае COSMO-Ru2By стартует от более близких к ее сетке трансформированных полей, полученных на сетке 6,6 км, а не 13,2 км, усваивает данные контактных наблюдений (в основном за начальный срок), а также данные ДМРЛ-С, и, следовательно, может начать счет и сформировать продукцию существенно раньше, чем вариант по «стандартной» схеме, «дождающийся» поступления продукции СУД ICON. В результате в таком режиме прогнозы по COSMO-Ru2By оказываются готовы раньше прогнозов по COSMO-Ru6ENA, относящихся к тому же начальному сроку. Такая схема вычислений целесообразна для решения задач наукастинга (работающего каждые 3 часа). В то же время одной из задач выполненного анализа оценок в рамках испытаний было понять, существенно ли снижение качества прогнозов за счет неучета данных СУД ICON за самый последний срок наблюдений. Поэтому оценивались прогнозы по COSMO-Ru2By, работавшей в режиме, названном нами экспериментальным.

#### 1.4. Формирование продукции в COSMO-Ru2By

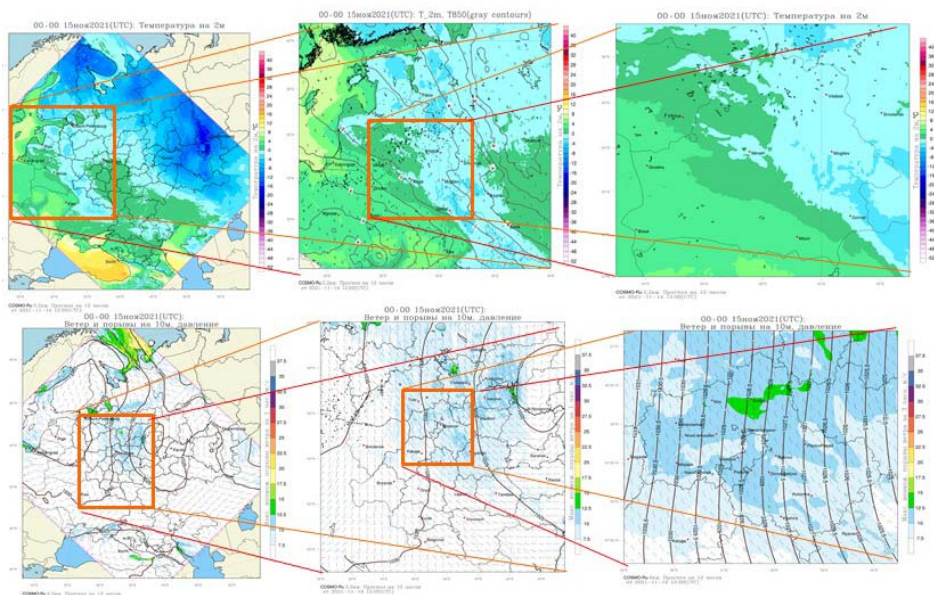
Приоритетным направлением предоставления продукции пользователям является формирование графической продукции. Электронные карты, метеограммы и аэрологические диаграммы доступны по локальной сети прогнозистам Гидрометцентра России и через специализированный веб-сайт, по сути, представляющий рабочее место синоптика [16, <https://special.meteoinfo.ru>]. Все графические продукты подготавливаются на основе пакетов визуализации (GRADS, NCL, Python).

Разработка дизайна карт и представления их на сайте основывалось на следующих принципах (см. рис. 3):

- 3-уровневая телескопизация – от более крупного охвата территории к отдельным регионам, с более детальным представлением информации (в том числе – по территории Республики Беларусь);
- комплексирование на одной карте различных видов информации;
- подбор фиксированных цветовых палитр для карт одинакового наполнения, но разных заблаговременностей для оптимального выявления угроз опасных явлений при последовательном просмотре карт;
- ежедневная обратная связь с прогнозистами.

Продукция COSMO-Ru2By, предоставляемая синоптикам, главным образом состоит из карт элементов приземной погоды: температуры воздуха на высоте 2 м и на уровне 850 гПа, фонового ветра на высоте 10 м и его порывов, осадков, давления на уровне моря. Отличительной особенностью COSMO-Ru2By является способность в силу своего пространственного разрешения явно описывать крупные (свыше высот 5–6 км) конвективные движения (более мелкие конвективные движения по-прежнему параметризованы), а также циркуляции наименьшего масштаба 10–20 км, в том числе связанные с неоднородностью свойств подстилающей поверхности. В результате, описание в модели многих

метеорологических процессов, обуславливающих характеристики ожидаемых погодных явлений, оказывается более физически обоснованным, чем у конфигураций с более грубым шагом (например, COSMO-Ru6ENA), использующих параметризацию (построенных на базе статистических соотношений) всех конвективных движений (т. е. описывающие не сам процесс, а результат конвективного приспособления). При этом в COSMO-Ru2By более реалистично, чем в случае применения параметризаций, формируются вертикальные профили метеорологических параметров, что позволяет более обоснованно использовать индексы, откалиброванные по данным измерений, для прогнозирования порывов ветра, гроз, града, формирования суперъячеек и т. д. Наиболее востребованными видами продукции по COSMO-Ru2By являются карты прогнозов индексов грозовой активности, порывов ветра, а также карты прогнозов радиолокационной отражаемости, формируемые при обработке информации микрофизического блока модели атмосферы.



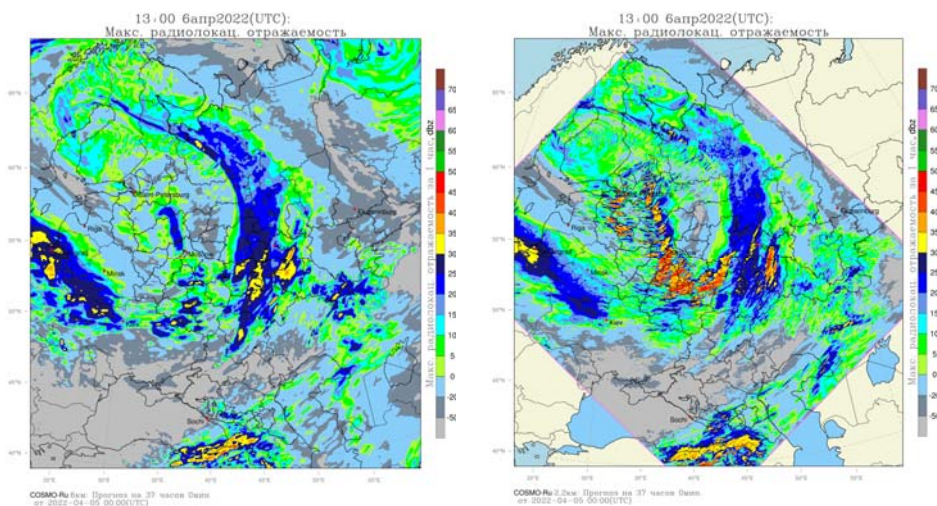
**Рис. 3.** Пример каскадного телескопирующего подхода визуализации продукции COSMO-Ru2By.

**Fig. 3.** An example of cascade visualization of COSMO-Ru2By results.

Карты прогностической радарной отражаемости являются важным видом информации об ожидаемой водности облачности при прогнозировании потенциальных угроз сильных локальных осадков/усиления ветра, которые могут не воспроизводиться более «грубыми» системами численного прогноза.

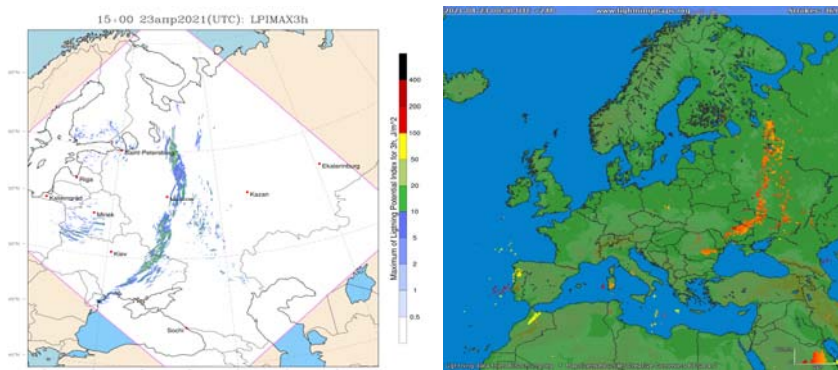
На рис. 4 приведен пример карт прогнозов радиолокационной отражаемости (являющейся в модели атмосферы диагностической величиной)

по COSMO-Ru6ENA (6,6 км) и COSMO-Ru2By (2,2 км) для 6 апреля 2022 г., когда в ряде районов ЦФО, в том числе в Московской области, наблюдались кратковременные, но интенсивные осадки из кучево-дождевой облачности в виде дождя и мокрого снега (до 3–10 мм/12ч), а также порывы ветра до 17–20 м/с. Угрозы таких явлений хорошо видны на карте по COSMO-Ru2By (отметим сравнительно большую для такого рода прогнозов заблаговременность – 37 часов!) и практически не проявлены на аналогичной карте по COSMO-Ru6ENA.



**Рис. 4.** Прогнозы максимальной радиолокационной отражаемости по COSMO-Ru6ENA (слева) и COSMO-Ru2By (справа) на 13.00 ч ВСВ 6 апреля 2022 г. Заблаговременность 37 ч. Старт от данных 05.04.2022, 00 ч ВСВ  
**Fig. 4.** Forecasts of maximum radar reflectivity by COSMO-Ru6ENA (left), and COSMO-Ru2By (right) at 13:00 UTC April 6, 2022. Lead time 37 hours. Initial data 05.04.2022, 00 UTC.

Экспертные оценки результатов прогнозов угроз конвективных процессов, проводимые прогнозистами в теплый период ежедневно при составлении прогнозов на ближайшие сутки, свидетельствуют о весьма высоком уровне качества информации, предоставляемой по COSMO-Ru2By. В то же время прогнозы сильных локальных осадков, грозových очагов, радиолокационной отражаемости, угроз формирования суперъячеек и смерчей сложно объективно проверить по имеющимся данным сети метеостанций. Сравнение (часто визуальное) с доступными картами ДМРЛ-С и грозопеленгаторов позволило говорить о высокой степени надежности этих прогнозов, что видно, например, из рис. 5, демонстрирующего расположение прогностических и наблюдаемых очагов грозовой активности 13 апреля 2021 г. (Отметим, что этот период года не является типичным для грозовой деятельности в данном регионе.)



**Рис. 5.** Прогноз грозовой активности по COSMO-Ru2By по индексу LPI (Lightning Potential Index, [23]) (слева); композит по данным грозопеленгаторов (данные lightningmaps.org) (справа) за 13.04.2021

**Fig. 5.** COSMO-Ru2By forecast of lightning activity based on the LPI (Lightning Potential Index, [23]) (left); composite map based on lightning direction finder data (lightningmaps.org) (right) for 13.04.2021.

## 2. Результаты исследования успешности COSMO-Ru2By

### 2.1. Особенности оперативных испытаний 2020–2021 гг.

Испытания COSMO-Ru2By проводились с сентября 2020 г. по октябрь 2021 года. К испытаниям были представлены прогнозы давления на уровне моря, температуры и точки росы на высоте 2 м, фоновой скорости ветра и его порывов на высоте 10 м, осадков заблаговременностью до 48 часов, рассчитанные по начальным данным за 00 ч ВСВ с шагом по времени 1, 3 и 12 часов для различных метеопараметров. Прогнозы были интерполированы в пункты наблюдений и сравнивались с данными сетевых синоптических метеостанций с осреднением по территории ЕТР (вне горных и прибрежных районов, ~175 станций), Республики Беларусь (37 станций), региона Северного Кавказа (около 100 станций) и по всей области интегрирования. При оценке осадков и порывов ветра часть станций (~4 %) была исключена из-за некорректной информации (в течение всего периода сообщалось значение «без осадков» или «отсутствие порывов ветра») [15].

Сравнение показателей успешности проводилось с показателями глобальных и региональных моделей. Среди глобальных моделей рассматривалась успешность функционирующих в Гидрометцентре России версий отечественной модели ПЛАВ, а также доступной в Росгидромете продукции центров UKMO (Великобритания), NCEP (США), DWD (Германия) и JMA (Япония), ECMWF (Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды). Важным методическим аспектом является факт, что используемые прогнозы модели ICON имели шаг  $0,25^\circ$ , не циркулирующие в рамках ГСТ и не доступные в оперативных системах визуализации синоптиков Гидрометцентра России и других прогностических центров

Росгидромета. Продукция других зарубежных моделей была представлена на более грубых сетках от  $1,5^\circ$  до  $0,5^\circ$ . Поэтому оценки по модели ICON, полученные в ходе испытаний, следует рассматривать в качестве ориентировочного уровня успешности глобальных моделей ведущих мировых центров с минимальным «заглублением», неизбежным вследствие технологических особенностей передач по каналам связи ВМО. Среди региональных моделей рассматривались функционирующая на CRAY XC40-LC «материнская» по отношению к COSMO-Ru2By конфигурация COSMO-Ru6ENA, а также функционирующие на менее мощной компьютерной технике COSMO-Ru7, и две конфигурации COSMO-Ru2 [8] для региона Северного Кавказа и для ЦФО, с целью выяснения целесообразности отмены их функционирования, а также WRF-ARW, работающей в Белгидромете.

Исследование успешности COSMO-Ru2By в период оперативных испытаний состояло из двух частей: основной и расширенной. Для основной части исследований было выполнено осреднение «традиционного» набора показателей успешности за период январь–октябрь 2021 г. В расширенной части для понимания реальной потребительской стоимости прогнозов высокой детализации, при оценке которых характерны проявления «двойных штрафов», были предприняты дополнительные расчеты оценок, не входящих в руководящие документы, но рассмотренные в Методических рекомендациях [5] и активно применяемые в настоящий момент в мировой практике.

Для анализа расширенного набора показателей успешности для осреднения были выбраны летний конвективный (май–август 2021 г.), переходный осенний (сентябрь–ноябрь 2020 г.) и зимний периоды (декабрь 2020 г. – февраль 2021 г.) Введение более подробного деления на периоды осреднения связано с необходимостью выявления эффектов, связанных со способностью работы модели с разрешающими конвективные движения шагами сетки в различных условиях преобладающей атмосферной стратификации. При этом было проведено дополнительное осреднение показателей в пределах меньших регионов (по Республике Беларусь, а также для региона Крым, Северный Кавказ, северных районов ЕТР). Помимо этого, анализ успешности продукции численных моделей с высоким разрешением требует своей специфики оценивания, поскольку основной целью развития таких моделей является прогноз опасных явлений таких пространственных масштабов, которые либо могут не «уловиться» существующей сетью наземных наблюдений, либо оказаться в ситуации «двойных штрафов».

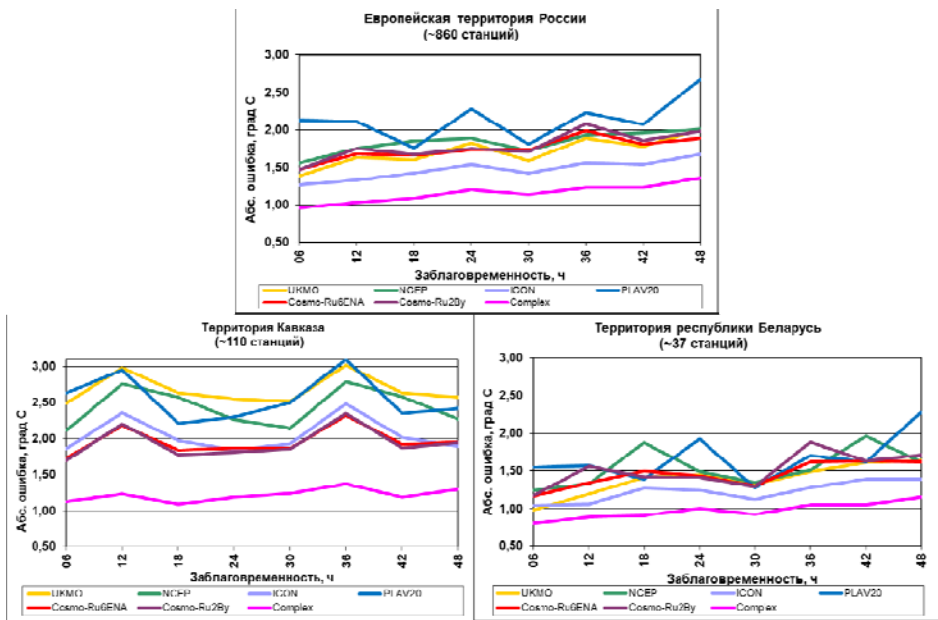
В рамках указанной расширенной части дополнительно для летнего периода 2021 г. были рассчитаны и проанализированы оценки прогнозов 1-часовых сумм осадков для региона ЦФО по результатам радиолокационных данных, выполненные с привлечением данных в радиусе 30 км от узлов, а также ежедневный мониторинг продукции, включающей, помимо метеорологических полей, карты прогностической радарной отражаемости, индексы конвекции, индексы угроз формирования суперъячеек

и смерчей на основе экспертной оценки прогнозистами Гидрометцентра России и УГМС ЦФО. Получение оценок, осредненных по длительным рядам случаев, в контексте на имеющемся технологическом уровне было невозможно в силу редкой для фиксации таких явлений наблюдательной сети. В дальнейшем требуется развитие технологий привлечения данных сетей гронопеленгаторов для выполнения оценок прогнозов гроз высокой детализации.

## 2.2. Выявленный уровень успешности прогнозов COSMO-Ru2By

*Анализ базовых показателей качества в рамках стандартной части испытаний* показал [14], что успешность прогнозов по COSMO-Ru2By:

– *приземной температуры воздуха*: на ЕТР и в Республике Беларусь была на уровне всех моделей, но лучше, чем PLAV20, однако несколько хуже модели ICON; на Кавказе – одинаково с моделью COSMO-RuBENA и лучше других моделей (рис. 6) [15];



**Рис. 6.** Осредненная по всему периоду испытаний абсолютная ошибка прогнозов приземной температуры воздуха (T2m). Малиновой линией показан уровень качества по комплексному прогнозу, выполняющему статистическую коррекцию модельных прогнозов по нескольким моделям (method.hydromet.ru).

**Fig. 6.** Absolute error of near-surface air temperature (T2m) forecasts averaged over the entire trial period (at the level of 2 m). The purple line shows the level of quality according to the “complex” forecast, which performs statistical correction of the model forecasts for several models (method.hydromet.ru).

– *фонового приземного ветра*: оказалась примерно на уровне всех участвующих моделей, но несколько хуже, чем по продукции моделей ICON (Германия) и JMA (Япония);

– *давления на уровне моря*: оказалась несколько хуже всех других моделей, за исключением оценок для региона Кавказа, где успешность была примерно на уровне других моделей;

– *порывов ветра* (их предоставляют только модели NCEP, ICON, COSMO-Ru6ENA и COSMO-Ru2By): с заблаговременностью 12 ч для случаев  $\geq 12$  м/с – хорошей (см. табл. 2), со значениями предупредительности свыше 50 % (эту «планку преодолели только COSMO-Ru6ENA и COSMO-Ru2By) и в 1,5 раза более низкими значениями коэффициента ложных тревог в сравнении с COSMO-Ru6ENA;  $\geq 18$  м/с – удовлетворительной,  $\geq 24$  м/с – мало удовлетворительной (как и у других моделей);

– *12-часовых сумм осадков до 24 часов*: по всем критериям оказалась выше других моделей и наравне с лучшей моделью ICON, а также COSMO-Ru6ENA.

В табл. 2 приведен пример оценок порывов ветра при сравнении «точка в точку» по продукции моделей NCEP (США), ICON (Германия), COSMO-Ru6ENA и COSMO-Ru2By по следующим показателям: U – общая оправдываемость; POD – предупредительность явления; kLT – коэффициент «ложных тревог», BX – критерий Багрова – Хейдке (HSS – по международной терминологии); ETS (Equitable Threat Score) – «справедливый уровень угрозы» (например, [5]). Использовались данные наблюдений примерно 800 станций на ETP.

Значения от N00 до N22 составляют таблицу сопряженности:

N00	N01	N02
N10	N11	N12
N20	N21	N22,

в которой

N00 – общее число случаев,

N01 = N11+N21 – число случаев с явлением,

N02 = N12+N22 – число случаев с отсутствием явления,

N10 = N11+N12 – число случаев с прогнозом явления,

N11 – явление прогнозировалось и наблюдалось,

N12 – явление прогнозировалось, но не наблюдалось («ложные тревоги»),

N20 = N21+N22 – число случаев с прогнозом отсутствия явления,

N21 – прогнозировалось отсутствие явления, но оно наблюдалось («пропуск цели»),

N22 – прогнозировалось отсутствие явления и его не наблюдалось.

Следуя приведенным данным, по большинству показателей у конфигурации COSMO-Ru2By была выявлена высокая успешность и превосходство аналогичных показателей доступных синоптикам Росгидромета видов продукции глобальных моделей (исключение составляет модель



ICON с предоставляемой продукцией на сетке высокого разрешения, что обсуждалось выше).

**Таблица 2.** Оценка прогнозов порывов ветра ( $\geq 12$  м/с) на 12 ч по ЕТР для периода 16 мая – 15 сентября 2021 г.

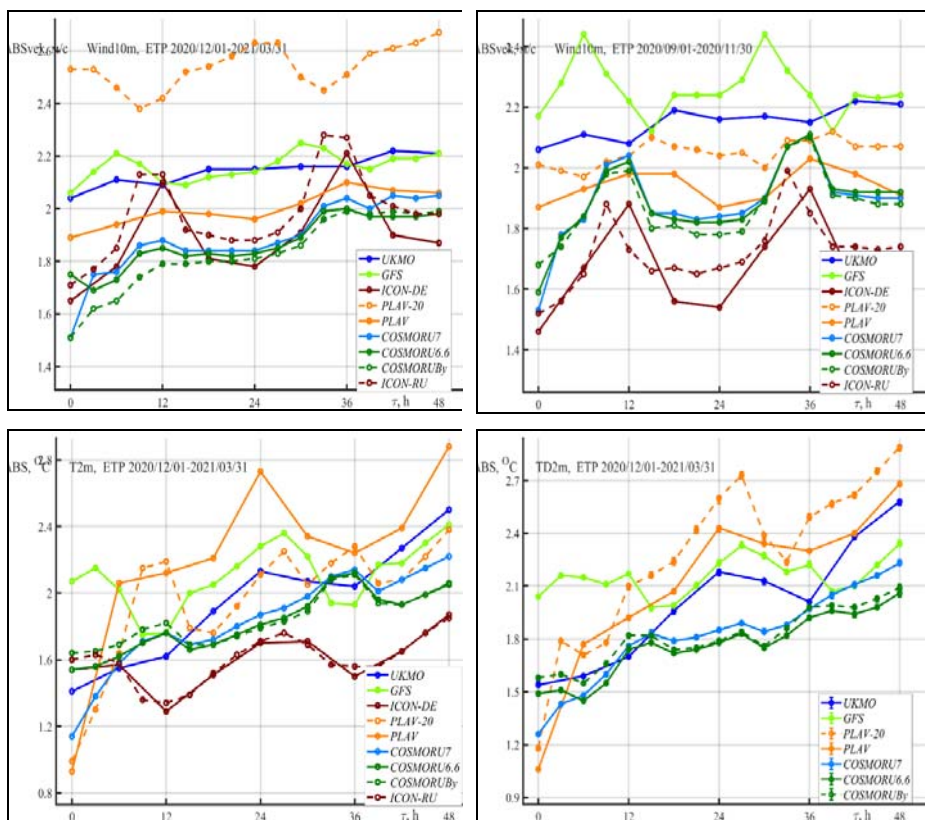
**Table 2.** Estimation of wind gust ( $\geq 12$  m/s) forecasts for 12 hours according to ETP for the period May 16 – September 15, 2021

Модель прогноза	Численные значения коэффициентов таблицы сопряженности			U	POD	kLT	БХ	ETS
	N00=	N01=	N02=					
NCEP	N00=98736	N01=11589	N02=87147	22	26	0,18	0,31	0,18
	N10=5020	N11=2981	N12=2039					
	N20=93716	N21=8608	N22=85108					
COSMO-Ru2By	N00=94302	N01=11078	N02=83224	28	58	1,08	0,34	0,20
	N10=18465	N11=6455	N12=12010					
	N20=75837	N21=4623	N22=71214					
COSMO-Ru6ENA	N00=96288	N01=11406	N02=84882	29	69	1,41	0,34	0,20
	N10=23849	N11=7821	N12=160228					
	N20=72439	N21=3585	N22=68854					
ICON	N00=100368	N01=11707	N02=88661	34	48	0,42	0,45	0,29
	N10=10609	N11=5667	N12=4942					
	N20=89758	N21=6040	N22=83719					

### 2.3. Анализ результатов расширенной части исследования

Результаты базовой части были подтверждены результатами более подробных исследований в рамках расширенной части. Например, при осреднении показателей прогнозов различных полей по всей области расчетов (рис. 7) скорость фонового ветра по COSMO-Ru2By (показано зеленым пунктиром) оказалась наименьшей при осреднении показателей для зимнего периода (декабрь 2020 г. – март 2021 г.) среди всех моделей, включая лидирующую в других ситуациях модель ICON (верхний левый

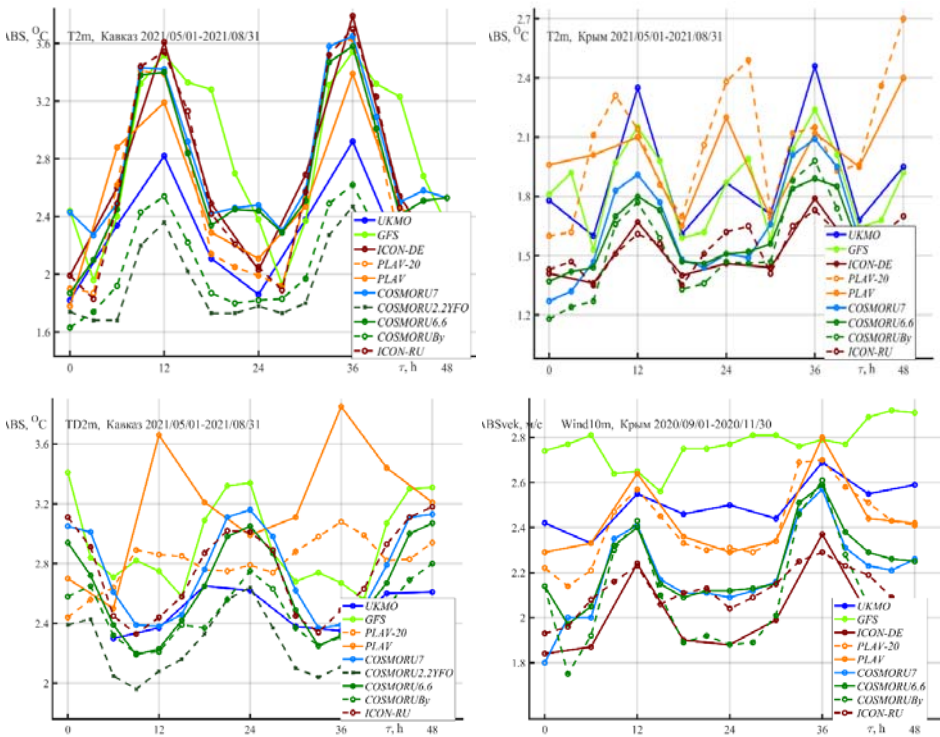
рисунок). В исследования были также включены прогнозы по конфигурации модели ICON, реализованной в Гидрометцентре России (по исходным данным системы усвоения Немецкой службы погоды) и в период испытаний производившей вычисления для апробации (коричневый пунктир).



**Рис. 7.** Примеры показателей успешности усреднения по всей области вычислений прогнозов различных метеопараметров по COSMO-Ru2By (зеленый пунктир) в сравнении с другими моделями: региональными COSMO-Ru6ENA, COSMO-Ru7 и глобальными: ПЛАВ, GFS, UKMO, ICON. Вычисления ICON, выполненные в DWD показаны сплошными линиями, а в Гидрометцентре России – пунктиром. Названия метеопараметров, виды оценок и периоды усреднения указаны в верхней части областей построения графиков.

**Fig. 7.** Examples of success indicators of absolute errors when averaging over the entire calculation domain of forecasts of various meteorological parameters by COSMO-Ru2By (green dotted line) in comparison with other models: limited-area COSMO-Ru6ENA, COSMO-Ru7 and global: PLAV, GFS, UKMO, ICON. ICON run results performed in DWD are shown by solid lines and performed in Hydrometcenter of Russia – by dotted ones. The names of meteorological parameters, types of estimates and averaging periods are indicated in the upper part of the plotting areas.

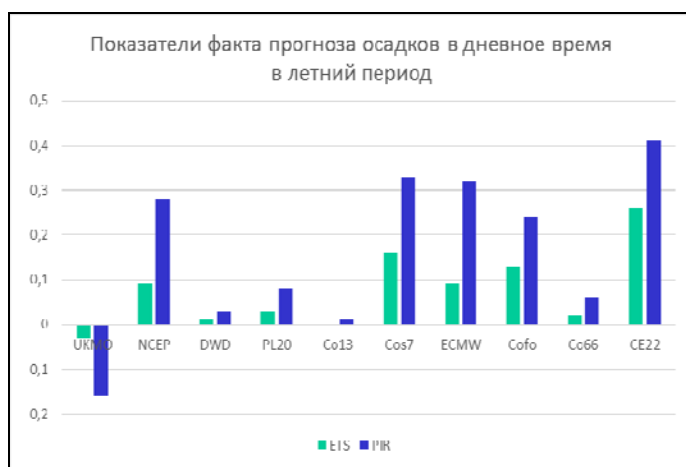
Таким образом, при осреднении по всей области расчетов было выявлено небольшое преимущество COSMO-Ru2By перед «материнской» по отношению к ней COSMO-Ru6ENA в прогнозировании фонового ветра в осенне-зимний период и близкие значения показателей для температуры, точки росы и давления. Однако при осреднении по регионам со сложными географическими условиями (Северный Кавказ, Крым) было выявлено очевидное преимущество продукции COSMO-Ru2By перед всеми другими участвовавшими в сравнениях более пространственно-грубыми вариантами прогнозов других моделей и конфигураций, в том числе COSMO-Ru6ENA. Примеры соотношения успешности в этом случае приводятся на рис. 8. Однако в сравнении с результатами ранее внедренной конфигурации COSMO-Ru2 для Северного Кавказа (на рис. 8 – левые панели графиков, обозначение COSMO-Ru2,2YFO) результаты COSMO-Ru2By не показали преимущества, а в ряде случаев – некоторое ухудшение прогнозов.



**Рис. 8.** Примеры показателей успешности, осредненных по регионам Крым и Северный Кавказ прогнозов различных метеопараметров по COSMO-Ru2By (зеленый пунктир) в сравнении с другими моделями.

**Fig. 8.** Examples of success indicators when averaging over the regions of Crimea and the North Caucasus for the forecasts of various meteorological parameters using COSMO-Ru2By (green dotted line) in comparison with other models.

Важным аспектом сравнения был анализ успешности прогнозов осадков. Несомненно, для летних осадков с высокой пространственно-временной изменчивостью, порой имеющих локальный характер, используемые данные сети метеостанций явно недостаточны для выявления особенностей продукции модели высокого разрешения. Кроме того, большое значение имеет подбор адекватных критериев успешности, учитывающих как «попадания в цель», так и штрафы за «ложные тревоги» с учетом редких событий. Для данного вида оценивания использовались значения прогностических полей, попавшие в зону радиуса 50 км вокруг пунктов наблюдений. В результате было выявлено убедительное преимущество прогнозов факта осадков в летний период по COSMO-Ru2By (на рис. 9 – самые правые столбики) по отношению к COSMO-Ru6ENA (как и по отношению к другим участвующим в сравнении моделям) для ЕТР по показателям ETS (0.25 по COSMO-Ru2By и значениям из интервала (-0.03; 0.15) по другим моделям) и критерию Пирса PSS (0.42 по COSMO-Ru2By и значениям из интервала (-15; 0.25) по другим моделям).



**Рис. 9.** Показатели успешности ETS (зеленый) и критерия Пирса (синий) для прогнозов по различным моделям, осредненные по ЕТР для прогнозов 12 ч сумм осадков на 36 часов для летнего периода. Сравнение наблюдений с результатами прогнозов в узлах на расстоянии до 50 км от станции наблюдений для летнего периода. По оси X – обозначения моделей – глобальных: UKMO, NCEP, ECMWF, PL20; и конфигураций модели COSMO в системах COSMO-Ru: Co13 – COSMO-Ru13ENA, Cos7 – COSMO-Ru7; Cofo – COSMO-Ru2CFO; Co66 – COSMO-Ru6ENA; CE22 – COSMO-Ru2By.

**Fig. 9.** ETS (green) and the Peirce Skill Score PSS (blue) averaged over European Part of Russia for various models of 12 hour precipitation sums for 36 lead time, summer period. The comparison of measurements with forecast results at nodes at a distance of up to 50 km from the observing station. Axe X: Indices of global models UKMO, NCEP, ECMWF, PL20; and COSMO-Configurations in COSMO-Ru systems Co13 – COSMO-Ru13ENA, Cos7 – COSMO-Ru7; Cofo – COSMO-Ru2CFO; Co66 – COSMO-Ru6ENA; CE22 – COSMO-Ru2By.

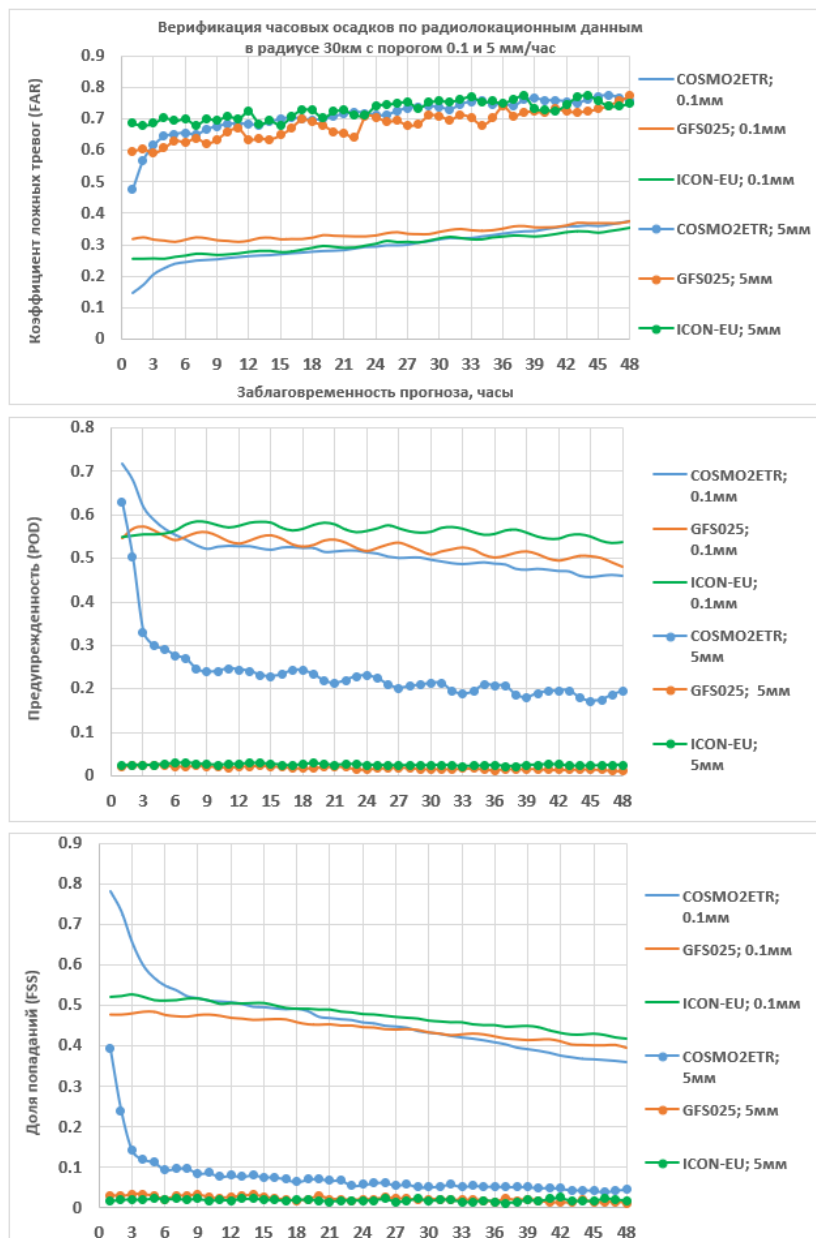
Особенности использования данных критериев рассмотрены в [4, 5]. Отметим, что при сравнении «точка в точку» и применения метрик типа общей оправдываемости по градациям преимущества по COSMO-Ru2By не носили такого убедительного характера.

Дополнительные сравнения показали, что для ЦФО при сравнении COSMO-Ru2By с ранее внедренной конфигурацией COSMO-Ru2CFO, также имеющей шаг сетки 2,2 км, наблюдалась близкая успешность при меньших ошибках, характеризующих количество осадков (систематическая и средняя абсолютная ошибки). Для региона Северного Кавказа прогнозы осадков по COSMO-Ru2By оказались несколько менее успешными, чем у внедренной конфигурации COSMO-Ru2YFO для Северного Кавказа (с 2016 г. основной метод численного прогноза по этому региону).

Следующим аспектом анализа успешности точности технологии на основе COSMO-Ru2By был анализ успешности сверхкраткосрочных прогнозов, включая наукастинг, по данным радарных измерений. Результаты такого сравнения рассматривались в период оперативных испытаний; в настоящей статье на рис. 10 также приводятся данные за летние месяцы 2022 г. (в связи с возможностью более полного анализа). Так, верификация 1-часовых сумм осадков по данным ДМРЛ-С в оба проанализированных летних периода 2021 и 2022 гг. выявила существенное превосходство COSMO-Ru2By, усваивающей радарную информацию, перед всеми другими моделями и конфигурациями COSMO-Ru для порога интенсивностей осадков 5 мм/ч на интервалах сверхкраткосрочного прогноза (от 0 до 12 часов от момента выпуска).

На рис. 10 показаны результаты сравнительной оценки прогнозов 1-часовых сумм осадков на интервалах сверхкраткосрочного и краткосрочного прогнозов, выполненные в рамках технологических возможностей развивающейся системы наукастинга Гидрометцентра России [6]. Оценки были рассчитаны путем сопоставления в квадратах 1-градусной сетки результатов прогнозов по узлам модели, расположенных в пределах 30 км от квадрата сравнения. На рисунке голубыми линиями показаны оценки COSMO-Ru2By (обозначение на рисунке COSMO2ETR). Из рисунка видно, что в указанной градации COSMO-Ru2By имеет наименьшие значения показателя ложных тревог (FAR), а также самые высокие значения предупрежденности (POD) и пространственной оценки доли попаданий FSS (Fractions Skill Score) [5]. Наиболее высокие значения FSS наблюдались в первые часы выпуска прогнозов и на интервалах сверхкраткосрочного прогноза.

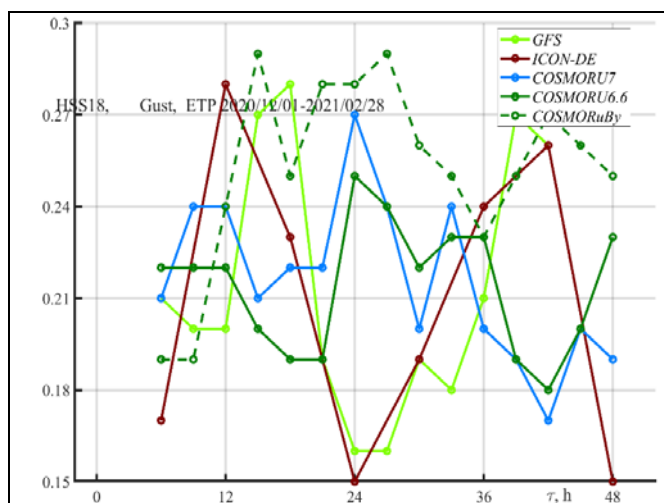
Наиболее очевидное превосходство COSMO-Ru2By перед прогнозами других модельных источников было выявлено для градации осадков с интенсивностью более 5 мм/1ч. Важным методическим результатом данной работы является получение одного из немногочисленных опытов в нашей стране оценок успешности гидродинамических прогнозов локальных явлений на основе радарной информации наряду с [4, 6].



**Рис. 10.** Результаты сравнения прогнозов 1-часовых сумм осадков с данными ДМРЛ-С (использованы данные в радиусе 30 км в окрестности модельных узлов) для порогов 0,1 и 5 мм/ч, период 1 июня – 1 августа 2022 г. (Расчет оценок выполнен на основе системы special.meteoinfo.ru).

**Fig. 10.** Results of comparison of 1-hour precipitation sums forecasts with DMRL-S data (data in a 30-km radius over model nodes are used) for a threshold of 0.1 and 5 mm/h, for June 1 – August 1, 2022 (Estimates were calculated based on the special.meteoinfo.ru system).

При оценках порывов ветра, имеющих в летний период локальный характер, особенно важен подбор соответствующих метрик для получения информативных оценок свойств прогнозов. Также в этом случае очевидно проявление проблемы «двойных штрафов». В этой связи разумно применение окрестных методов верификации. В рамках проведенных испытаний, по данным не очень густой наблюдательной сети, реально было ограничиться привлечением данных прогнозов в окрестности 50 км от пунктов наблюдений. В результате для прогнозов порывов ветра свыше 18 м/с для летнего и зимнего периодов было выявлено превосходство успешности прогнозов COSMO-Ru2By над материнской моделью COSMO-Ru6ENA для ЕТР и Республики Беларусь при применении критерия HSS, причем по окрестности 50 км (что приблизительно соответствует 0,5 град) это преимущество оказалось весьма убедительным (рис. 11).



**Рис. 11.** Пример значений HSS для порывов ветра для окрестности 50 км вокруг пунктов.

**Fig. 11.** Example of HSS values for wind gusts for a 50 km neighborhood around.

Важным аспектом испытательного периода были ежедневные экспертные оценки прогнозистов предлагаемой графической продукции по COSMO-Ru2By. Визуальное сопоставление карт прогнозов зон грозовой активности (по индексу LPI, [18, 24]) и радарной отражаемости с картами грозопеленгаторов и радарных композитов (например, [25]) подтвердили важную информативность этих прогнозов. В дальнейшем целесообразно создание в Гидрометцентре России технологии получения и использования информации грозопеленгаторов в цифровом виде для получения объективных оценок успешности численных прогнозов высокой детализации прогнозов опасных конвективных явлений локального характера.

### Обсуждение и выводы

Анализ успешности прогнозов погоды на основе разработанной технологической линии COSMO-Ru2By за тестовые периоды сравнения во время оперативных испытаний 2020–2021 гг. и подтвержденным результатам мониторинга в 2022 г. выявил, что сверхкраткосрочные и краткосрочные до 48 часов прогнозы COSMO-Ru2By имеют высокую успешность в подавляющем большинстве случаев в сравнении с доступной прогнозистам Росгидромета продукцией глобальных моделей – отечественной ПЛАВ и зарубежных, полученных по каналам ГСТ, на сетках от  $0,5^\circ$  до  $1,25^\circ$  (исключение составляет модель ICON с продукцией на сетке разрешения  $0,25^\circ$ , не циркулирующей по каналам ГСТ); при этом отмечено некоторое отставание успешности прогнозов давления на уровне моря COSMO-Ru2By.

Исходя из проведенного в статье исследования успешности прогнозов конфигурации COSMO-Ru2By модели COSMO можно сделать следующие выводы.

- По сравнению с «материнской» моделью COSMO-Ru6ENA, COSMO-Ru2By в большинстве случаев показала близкую успешность; выявлено преимущество COSMO-Ru2By перед COSMO-Ru6ENA и всеми другими участвовавшими в сравнениях моделями в прогнозах факта осадков для летнего периода по показателям ETS и критерию Пирса (PSS), а также порывов ветра свыше 18 м/с для летнего периода при использовании данных метеостанций в окрестности 50 км по критерию Хайдке (HSS), используемого для оценок редких событий.

- Использование этих критериев целесообразно ввести в нормативы для оперативных испытаний, поскольку в текущий период все больше технологий будут иметь высокое разрешение, преимущество которого в сравнении с более сглаженными методиками не всегда возможно выявить при использовании стандартных подходов сравнения «точка в точку».

- Выявлено существенное превосходство прогнозов технологии COSMO-Ru2By по сравнению с COSMO-Ru6ENA по всем параметрам приземной погоды для регионов со сложной орографией (Северный Кавказ, Крым). Однако выявлено и некоторое снижение успешности по сравнению с результатами вычислений конфигурации с тем же шагом  $2,2$  км для региона Северного Кавказа (COSMO-Ru2YFO, внедренная в 2016 году [24]), не учитывающей данные ДМРЛ-С.

- Проведено сравнение сверхкраткосрочных прогнозов 1-часовых сумм осадков с данными ДМРЛ-С и выявлено существенное превосходство успешности прогнозов осадков с интенсивностью свыше 5 мм/ч при сравнении с данными ДМРЛ-С по сравнению со всеми доступными данными других моделей, а также конфигурацией COSMO-Ru6ENA, не усваивающей радарную информацию.

- Использование усвоения данных об интенсивности осадков по радарным наблюдениям по методу LHN позволяет улучшить качество



начальных данных не только для прогнозов осадков, но и для сопутствующих характеристик: порывов ветра, грозовой активности, локальных возмущений в поле давления, температуры, точки росы. К сожалению, существующая сеть метеостанций, как правило, не улавливает таких быстрых изменений. В отдельных случаях они могут регистрироваться на АМС с 10-минутной периодичностью измерений, профилемерах или ДМРЛ-С, данные которых в будущем целесообразно привлекать для проведения оперативных испытаний.

• Выявленные преимущества COSMO-Ru2By при прогнозировании локальных явлений преимущественно конвективной природы ( $\gamma$ -мезомасштаба), по оценкам с применением радиусов 30 и 50 км относительно точек наблюдений свидетельствуют о целесообразности учета этих свойств прогнозистами при интерпретации результатов численных прогнозов высокой детализации.

Выполненный анализ указал на ряд позиций для дальнейшего усовершенствования технологии выпуска численных прогнозов на основе COSMO-Ru2By. Так, было отмечено два важных случая небольшого систематического «отставания» COSMO-Ru2By:

1. *Оценки давления на уровне моря.* Выявлено небольшое систематическое «отставание» (порядка 0,5 гПа в течение всего прогноза, в начале прогностического периода существенно меньше). Причиной этому, по всей видимости, является использование в качестве полей первого приближения, для последующего усвоения данных, сверхкраткосрочных прогнозов по COSMO-Ru6ENA, несколько теряющих точность к заблаговременности 6 часов, а не результатов системы усвоения из системы глобального прогноза ICON (в которых большое внимание, в частности, уделено информации МИСЗ). Причем в начале прогностического периода отклонения минимальны, поскольку COSMO-Ru2By усваивает текущие данные приземного давления. Старт от полей прогноза COSMO-Ru6ENA (не дожидаясь поступления результатов ICON) позволяет получить прогнозы по COSMO-Ru2By на 1 час раньше и снизить эффекты спин-апа, что важно для наукастинга. Однако в последующие 12 часов имеется существенно меньшее количество информации, используемое при усвоении данных, что приводит к снижению качества прогноза давления.

2. *Оценки ряда метеорологических параметров для региона Северо-го Кавказа в сравнении с конфигурацией COSMO-Ru2YFO, также имеющей шаг сетки 2,2 км.* Отметим, что в технологии COSMO-Ru конфигурация COSMO-Ru2YFO функционирует в «стандартном» режиме (см. раздел 1, табл. 1), т. е. с использованием результатов глобальной СУД технологии ICON за начальный срок прогнозов, а COSMO-Ru2By – за предыдущий с последующим Nudging усвоением. По-видимому, для данного региона процедуры Nudging и доступных ей данных наблюдений недостаточно для достижения уровня прогнозов, базирующихся на результатах СУД ICON. Интересно, что для района ЦФО такого ухудшения качества выявлено не было: по-видимому, ЦФО оказался существенно

лучше освещен данными наблюдений, доступными Nudging (аэрологические и синоптические метеостанции, ДМРЛ-С).

Таким образом, целесообразно оперативно считать COSMO-Ru2By в обоих режимах, о которых идет речь в разделе 1: экспериментальном (для которого был получен набор оценок при выполнении испытаний) для прогнозов на ближайшие часы с усвоением данных метеостанций и радарной информации по методам Nudging и LHN, очень ценным при прогнозировании опасных явлений на ближайший период и счетом до 18 часов каждые 3 часа; и стандартном, также с усвоением данных по методам Nudging и LHN, однако после получения результатов усвоения данных ICON, нацеленных на прогнозирование погоды на ближайшие 2 суток. Результаты прогнозов в этом режиме в итоге будут формироваться примерно на час позже.

Несмотря на указанные небольшие недостатки, анализ качества прогнозов по COSMO-Ru2By, проведенный во время испытаний в период 2020–2021 гг. и подтвержденный последующим мониторингом успешности, свидетельствует о его высоком уровне и целесообразности преимущественного использования прогнозов до 48 ч перед всеми другими технологиями с более грубым разрешением сеток, включая COSMO-Ru6ENA в летние месяцы и для горных регионов.

Отметим, что по результатам проведенных испытаний Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета [<http://method.meteorf.ru/>] рекомендовала внедрить в оперативную практику Гидрометцентра России и прогностических центров Росгидромета сверхкраткосрочный и краткосрочный численный прогноз по конфигурации COSMO-Ru2By до заблаговременности 48 ч следующих характеристик:

- ✓ приземные температура, влажность и скорость ветра, наряду с основным методом COSMO-Ru6ENA как дополняющий и детализирующий;
- ✓ осадки в качестве основного метода численного прогноза;
- ✓ порывы ветра свыше 12 и 18 м/с в качестве вспомогательного метода численного прогноза.

#### Список литературы

1. Биков Ф.Л. Статистическая коррекция прогнозов погоды по модели COSMO с помощью нейронных сетей // Метеорология и гидрология. 2020. № 3. С. 5-20.
2. Блинов Д.В., Ривин Г.С. Система краткосрочного негидростатического прогноза погоды COSMO-Ru: технологическая линия // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 365. С. 142-162.
3. Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М. Мезометеорологические процессы: Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 2006. 127 с.
4. Зарипов Р.Б., Павлюков Ю.Б., Шумилин А.А., Травов А.В. Использование радиолокационной информации при оценке прогноза погоды с высоким разрешением // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2 (368). С. 60-86.
5. Киктев Д.Б., Муравьев А.В., Бундель А.Ю. Методические рекомендации по верификации метеорологических прогнозов. М.: АМА ПРЕСС, 2021. 94 с.
6. Киктев Д.Б., Муравьев А.В., Смирнов А.В. Наукастинг метеорологических параметров и опасных явлений: опыт реализации и перспективы развития // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 92-111.

7. Полохов А.А., Блинов Д.В. Оценка влияния учета аэрозолей на прогноз температуры по данным модели COSMO-Ru // *Метеорология и гидрология*. 2021. № 1. С. 29-39.

8. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Багров А.Н., Блинов Д.В. Мезомасштабная модель COSMO-Ru7 и результаты ее оперативных испытаний // *Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов*. 2012. Информационный сборник № 39. С. 15-48.

9. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Багров А.Н., Блинов Д.В., Кирсанов А.А., Кузьмина Е.В., Шатунова М.В., Чумаков М.М., Алферов Д.Ю., Бундель А.Ю., Зайченко М.Ю., Никитин М.А. Мезомасштабная модель COSMO-Ru2 и результаты ее оперативных испытаний // *Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов*. 2017. Информационный сборник № 44. С. 25-55.

10. 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. 58-71.

11. Ривин Г.С., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Розинкина И.А., Тудрий К.О., Блинов Д.В., Варенцов М.И., Самсонов Т.Е., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Захарченко Д.И. Система численного прогнозирования явлений погоды, включая опасные, для Московского мегаполиса: разработка прототипа // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 11. С. 33-45.

12. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Тудрий К.О., Блинов Д.В., Варенцов М.И., Захарченко Д.И., Самсонов Т.Е., Репина И.А., Артамонов А.Ю. Разработка оперативной системы численного прогноза погоды и метеоусловий опасных явлений с высокой детализацией для Московского региона // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 7. С. 5-19.

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

14. Ривин Г.С., Багров А.Н., Розинкина И.А., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Никитин М.А., Шатунова М.В., Воробьева Е.В. Краткосрочный численный прогноз высокого разрешения приземной погоды и метеорологических параметров свободной атмосферы на базе конфигурации COSMO-RuBENA (шаг сетки 6,6 км, заблаговременность до 84 часов) модели COSMO по Северной Евразии, включая СНГ // *Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов*. 2022. Информационный сборник № 49. С. 57-71.

15. Розинкина И.А., Елисеев Г.В., Ривин Г.С., Багров А.Н., Блинов Д.В., Быков Ф.Л., Шатунова М.В., Захарченко Д.И., Бундель А.Ю., Воробьева Е.В., Астахова Е.Д., Алферов Ю.В., Кирсанов А.А., Копейкин В.В., Полохов А.А., Ревокатова А.П., Васькова Д.В. Краткосрочный численный прогноз погоды заблаговременностью до 48 часов на основе модели атмосферы высокого пространственного разрешения COSMO-Ru2Bu (шаг сетки 2,2 км) для Европейской территории России и для Республики Беларусь // *Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов*. 2022. Информационный сборник № 49. С. 72-91.

16. Розинкина И.А., Ривин Г.С., Бурак Р.Н., Астахова Е.Д., Алферов Ю.В., Блинов Д.В., Быков Ф.Л., Васькова Д.В., Волкова В.А., Воробьева Е.В., Зайко П.О., Жабина И.И., Недачина А.Ю., Прохареня М.И., Елисеев Г.В. Формирование продукции систем негидростатического моделирования атмосферы COSMO-RuBu (Гидрометцентр России) и WRF-ARW (Белгидромет) для краткосрочного прогноза погоды // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2021. № 4 (382). С. 6-30.

17. Baldauf M., Seifert A., Forstner J., Majewski D., Raschendorfer M., Reinhardt T. Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: description and sensitivities // *Mon. Wea. Rev.* 2011. Vol. 139. P. 3887-3905.

18. Brisson E., Blahak U., Lucas-Picher Ph., Purr C., Ahrens B. Contrasting lightning projection using the lightning potential index adapted in a convection-permitting regional climate model // *Climate Dynamics*. 2021. Vol. 57, no. 12. P. 2037-2051.

19. Stephan K., Klink S., Schraff C. Assimilation of radar-derived rain rates into the convective model COSMO-DE at DWD // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2008. Vol. 134. P. 1315-1326.
20. Stephan K., Schraff C. Improvements of the operational latent heat nudging scheme used in COSMO-DE at DWD // COSMO Newsletter. 2008. Vol. 9. P. 7-11.
21. Steppeler J., Doms G., Schaettler U., Bitzer H.-W., Gassmann A., Damrath U., Gregoric G. Meso-gamma scale forecasts using the nonhydrostatic model LM // Meteorol. Atmos. Phys. 2003. Vol. 82. P. 75-96.
22. Zangl G., Reinert D., Ripodas P., Baldauf M. The ICON (ICOsahedral Nonhydrostatic) modeling framework of DWD and MPI-M: Description of the nonhydrostatic dynamical core // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2015. Vol. 14. P. 563-579.
23. Сайт консорциума COSMO с документацией модели COSMO: <http://cosmo-model.org/content/model/documentation/core/default.htm>. 11.
24. Образовательный раздел сайта NOAA: [https://www.weather.gov/gjt/LPI\\_Tutorial#](https://www.weather.gov/gjt/LPI_Tutorial#)
25. Сайт интегрированных оперативных сведений о грозовой активности: [lightning-maps.org](http://lightning-maps.org)

### References

1. Bykov F.L. Statistical Correction of the COSMO Model Weather Forecasts Based on Neural Networks. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2020, vol. 45, pp. 141-152. DOI: 10.3103/S1068373920030012.
2. Blinov D.V., Rivin G.S. The short-term non-hydrostatic mesoscale weather forecast system COSMO-Ru: The technological line. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 365, pp. 142-162 [in Russ.].
3. Vel'tishchev N.F., Stepanenko V.M. Mezometeorologicheskie processy: Uchebnoe posobie. Moscow, MSU publ., 127 p. [in Russ.].
4. Zaripov R.B., Pavlyukov Yu.B., Shumilin A.A., Travov A.V. Application of radar information for verification of the high-resolution numerical weather prediction. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2018, vol. 368, no. 2, pp. 60-86 [in Russ.].
5. Kiktev D.B., Murav'ev A.V., Bundel' A.Yu. Metodicheskie rekomendacii po verifikacii meteorologicheskikh prognozov. Moscow, AMA PRESS publ., 2021, 94 p. [in Russ.].
6. Kiktev D.B., Muravev A.V., Smirnov A.V. Nowcasting of meteorological parameters and hazards: implementation experience and development prospects. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 374, no. 4, pp. 92-111 [in Russ.].
7. Poliukhov A.A., Blinov D.V. Aerosol Effects on Temperature Forecast in the COSMO-Ru Model. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2021, vol. 46, pp. 19-27. DOI: 10.3103/S1068373921010039.
8. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Bagrov A.N., Blinov D.V. Mezomasshtabnaya model' COSMO-Ru7 i rezul'taty ee operativnykh ispytaniy. *Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*, 2012. Informacionnyy sbornik № 39, pp. 15-48 [in Russ.].
9. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Bagrov A.N., Blinov D.V., Kirsanov A.A., Kuz'mina E.V., Shatunova M.V., Chumakov M.M., Alferov D.Yu., Bundel' A.Yu., Zaychenko M.Yu., Nikitin M.A. Mezomasshtabnaya model' COSMO-Ru2 i rezul'taty ee operativnykh ispytaniy. *Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*, 2017. Informacionnyy sbornik № 44, pp. 25-55 [in Russ.].
10. 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, pp. 400-410. DOI: 10.3103/S1068373915060060.
11. Rivin G.S., Vil'fand R.M., Kiktev D.B., Rozinkina I.A., Tudriy K.O., Blinov D.V., Var-entsov M.I., Samsonov T.E., Bundel' A.Yu., Kirsanov A.A., Zakharchenko D.I. The System for Numerical Prediction of Weather Events (Including Severe Ones) for Moscow Megacity: The Prototype Development. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2019, vol. 44, pp. 729-738. DOI: 10.3103/S1068373919110025.

12. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Vil'fand R.M., Tudrii K.O., Blinov D.V., Varentsov M.I., Zakharchenko D.I., Samsonov T.E., Repina I.A., Artamonov A.Yu. Development of the High-resolution Operational System for Numerical Prediction of Weather and Severe Weather Events for the Moscow Region. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, pp. 455-465. DOI: 10.3103/S1068373920070018.

13. 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., Kopeykin 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.].

14. Rivin G.S., Bagrov A.N., Rozinkina I.A., Blinov D.V., Bundel' A.Yu., Kirsanov A.A., Nikitin M.A., Shatunova M.V., Vorob'eva E.V. Kratkosrochnyy chislennyy prognoz vysokogo razresheniya prizemnoy pogody i meteorologicheskikh parametrov svobodnoy atmosfery na baze konfiguratsii SOSMO-Ru6ENA (shag setki 6,6 km, zablagovremennost' do 84 chasov) modeli SOSMO po Severnoy Evrazii, vlyuchaya SNG. *Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*, 2022. Informatsionnyy sbornik № 49, pp. 57-71 [in Russ.].

15. Rozinkina I.A., Eliseev G.V., Rivin G.S., Bagrov A.N., Blinov D.V., Bykov F.L., SHatunova M.V., Zaharchenko D.I., Bundel' A.Yu., Vorob'eva E.V., Astakhova E.D., Alferov YU.V., Kirsanov A.A., Kopeykin V.V., Polyuhov A.A., Revokatova A.P., Vas'kova D.V. Kratkosrochnyy chislennyy prognoz pogody zablagovremennost'yu do 48 chasov na osnove modeli atmosfery vysokogo prostranstvennogo razresheniya COSMO-Ru2By (shag setki 2,2 km) dlya Evropeyskoy territorii Rossii i dlya Respubliki Belarus'. *Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*, 2022, Informatsionnyy sbornik № 49, pp. 72-91.

16. Rozinkina I.A., Rivin G.S., Burak R.N., Astakhova E.D., Alferov Yu.V., Blinov D.V., Bykov Ph.L., Vaskova D.V., Volkova V.A., Vorob'eva E.V., Zayko P.O., Zhabina I.I., Nedachina A.Yu., Prockharenya M.I., Eliseev G.V. Forming of the products of non-hydrostatic modelling systems for short-range weather prediction COSMO-RuBy (Hydrometcentre of Russia) и WRF-ARW (Belhydromet). *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2021, vol. 382, no. 4, pp. 6-30 [in Russ.].

17. Baldauf M., Seifert A., Forstner J., Majewski D., Raschendorfer M., Reinhardt T. Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: description and sensitivities. *Mon. Wea. Rev.*, 2011, vol. 139, pp. 3887-3905.

18. Brisson E., Blahak U., Lucas-Picher Ph., Purr C., Ahrens B. Contrasting lightning projection using the lightning potential index adapted in a convection-permitting regional climate model. *Climate Dynamics*, 2021, vol. 57, no. 12, pp. 2037-2051.

19. Stephan K., Klink S., Schraff C. Assimilation of radar-derived rain rates into the convective model COSMO-DE at DWD. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2008, vol. 134, pp. 1315-1326.

20. Stephan K., Schraff C. Improvements of the operational latent heat nudging scheme used in COSMO-DE at DWD. *COSMO Newsletter*, 2008, vol. 9, pp. 7-11.

21. Steppeler J., Doms G., Schaettler U., Bitzer H.-W., Gassmann A., Damrath U., Gregoric G. Meso-gamma scale forecasts using the nonhydrostatic model LM. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 2003, vol. 82, pp. 75-96.

22. Zangl G., Reinert D., Ripodas P., Baldauf M. The ICON (ICOSahedral Nonhydrostatic) modeling framework of DWD and MPI-M: Description of the nonhydrostatic dynamical core. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2015, vol. 14, pp. 563-579.

23. Sajt konsorciuma COSMO s dokumentacij modelu COSMO: <http://cosmo-model.org/content/model/documentation/core/default.htm>. 11.

24. Obrazovatel'nyj razdel sajta NOAA: [https://www.weather.gov/gjt/LPI\\_Tutorial#](https://www.weather.gov/gjt/LPI_Tutorial#)

25. Sajt integrirovannykh operativnykh svedenij o grozovoj aktivnosti lightningmaps.org

Поступила 12.05.2023; одобрена после рецензирования 30.05.2023;  
принята в печать 13.06.2023.

Submitted 12.05.2023; approved after reviewing 30.05.2023;  
accepted for publication 13.06.2023.