

*Г.С. Ривин, А.Н. Багров, И.А. Розинкина, Д.В. Блинов,
А.Ю. Бундель, А.А. Кирсанов, М.А. Никитин, М.В., Шатунова Е.В. Воробьева*

**КРАТКОСРОЧНЫЙ ЧИСЛЕННЫЙ ПРОГНОЗ ВЫСОКОГО
РАЗРЕШЕНИЯ ПРИЗЕМНОЙ ПОГОДЫ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ СВОБОДНОЙ АТМОСФЕРЫ
НА БАЗЕ КОНФИГУРАЦИИ COSMO-Ru6ENA
(ШАГ СЕТКИ 6,6 КМ, ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬ ДО 84 ЧАСОВ)
МОДЕЛИ COSMO ПО СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ, ВКЛЮЧАЯ СНГ**

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

Введение

В соответствии с планами испытания и внедрения новых и усовершенствованных методов (технологий) гидрометеорологических прогнозов на 2020 и 2021 гг. в течение полного 2020 года в Гидрометцентре России были проведены оперативные испытания системы выпуска региональных численных прогнозов COSMO-Ru6ENA с шагом вычислительной сетки 6.6 км и областью вычислений, включающей всю северную половину Евразийского континента и прилегающие акватории. Конфигурация COSMO-Ru6ENA реализована на суперкомпьютера «Росгидромет» Cray XC40-LC как базовая ступень каскадной системы COSMO-Ru регионального численного прогноза с повышающейся детализацией для отдельных районов. Технологический комплекс COSMO-Ru6ENA был создан в процессе выполнения темы 1.1.3 «Развитие и совершенствование системы нового поколения краткосрочного прогноза погоды COSMO-Ru сверхвысокого разрешения (с шагами сетки до 1 км) на основе бесшовной негидростатической модели атмосферы ICON» Плана НИТР НИУ Росгидромета на 2020–2024 гг. (АААА-А20-120021490079-3). Важными выводами проведенных испытаний было подтверждение высокой степени достоверности выпускаемых прогнозов в сравнении с доступными результатами глобального численного прогноза ведущих мировых центров по численному прогнозированию, а также выявление соотношений успешности новой конфигурации COSMO-Ru6ENA модели COSMO и

внедренных ранее на менее мощной вычислительной технике COSMO-Ru13ENA (шаг сетки 13.2 км) и COSMO-Ru7 (шаг сетки 7 км).

1. Описание технологии COSMO-Ru6ENA

В Гидрометцентре России в рамках выполнения темы 1.1.3 «Развитие и совершенствование системы нового поколения краткосрочного прогноза погоды COSMO-Ru сверхвысокого разрешения (с шагами сетки до 1 км) на основе бесшовной негидростатической модели атмосферы ICON» Плана НИТР НИУ Росгидромета была разработана технологическая линия численного высоко детального краткосрочного прогноза приземной погоды и метеорологических параметров свободной атмосферы на основе модели международного консорциума COSMO [11, 12, <http://www.cosmo-model.org>, [model.org/content/model/documentation/core/default.htm](http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/default.htm)]. В рамках данной технологии была создана и реализована на суперкомпьютере «Росгидромет» Cray XC40-LC конфигурация COSMO-Ru6ENA с шагом сетки 6,6 км и областью вычислений, включающей полностью территорию России и Европы, большей части региона Центральной Азии, а также прилегающие акватории морей Атлантического, Северного Ледовитого и Тихого океанов (рис. 1).

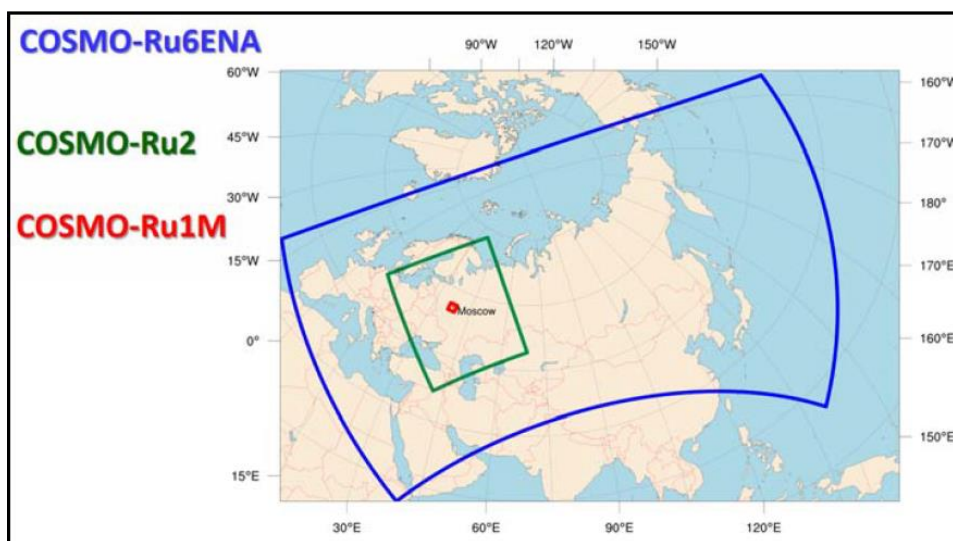


Рис. 1. Области вычислений COSMO-Ru6ENA с шагом сетки 6.6 км (синий контур), COSMO-Ru2 с шагом 2.2 км (зеленый), COSMO-Ru1M с шагом 1 км (красный).

Ранее была реализована, апробирована и по итогам оперативных испытаний на основании Решения ЦМКП Росгидромета от 21 ноября 2018 г. внедрена в оперативную практику в качестве основного расчетного метода краткосрочных прогнозов элементов погоды для регионов России конфигурация COSMO-Ru13ENA для совпадающей с COSMO-Ru6ENA области вычислений, но на значительно менее мощной вычислительной технике

ММЦ Москва. Эксплуатация COSMO-Ru13ENA позволила разработчикам получить важный опыт для создания аналогичной технологии на суперкомпьютере CRAY XC40-LX с более высоким разрешением.

COSMO-Ru6ENA является базовой ступенью «каскадной» системы COSMO-Ru регионального численного прогноза с повышающейся детализацией для отдельных районов. Так, в течение разработки COSMO-Ru6ENA параллельно началось развитие конфигурации COSMO-Ru2By с шагом 2.2 км для территорий Республики Беларусь и Европейской территории России [10] и COSMO-Ru1M для Московского региона [6]. Также во время проведения игр зимней Универсиады в Красноярске в 2018 году работавшая в то время в экспериментальном режиме COSMO-Ru6ENA предоставляла прогнозы на сетке 6.6 км для дальнейшей телескопизации специальными конфигурациями COSMO-Ru с шагом 2.2 км для юга Восточной Сибири и с шагом 1.1 км непосредственно для области проведения Игр.

Структура «каскадной» системы показана на рис. 2. Начальные данные и боковые условия для COSMO-Ru6ENA поступают из глобальной модели ICON Немецкой службы погоды [13]. В свою очередь вычислительный комплекс COSMO-Ru6ENA формирует необходимую информацию для вычислений по «вложенным» сеткам для конфигураций более высокой детализации COSMO-Ru2ETR (COSMO-Ru2By) и COSMO-Ru1M, при этом количество вложенных доменов может быть любым.

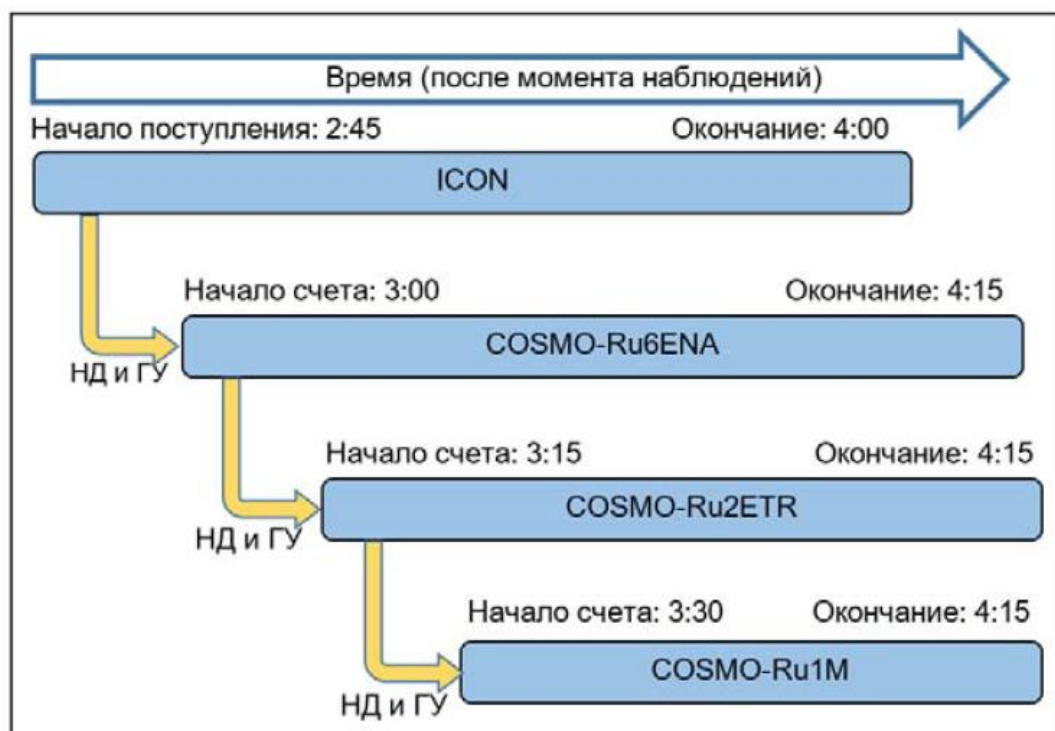


Рис. 2. Структура иерархической «каскадной» системы численного прогноза погоды на основе COSMO-Ru6ENA.

Разработанная версия COSMO-Ru6ENA характеризуется, по сравнению с предшествующей аналогичной версией COSMO-Ru13ENA, следующим. Во-первых, при реализации версии модели COSMO-Ru6ENA на суперкомпьютере «Росгидромет» Cray XC40-LC были выполнены работы по повышению эффективности распараллеливания вычислительных процессов [3, 9], что позволило без увеличения времени счета выполнять вычисления с вдвое меньшим шагом расчетной сетки (6,6 км вместо 13,2 км), т. е. существенно повысить пространственную детализацию прогнозов. Во-вторых, конфигурация модели COSMO-Ru6ENA создана на основе новейшей версии модели COSMO одноименного консорциума [<http://www.cosmo-model.org>] с использованием обновленных модулей физических параметризаций, настроек и новых международных архивов свойств подстилающей поверхности высокой детализации. В COSMO-Ru6ENA в сравнении с COSMO-Ru13ENA в 2 раза уменьшен шаг сетки. Ожидаемая детализация циркуляционных процессов в конфигурации COSMO-Ru6ENA составляет 40–50 км (примерно такая же и у COSMO-Ru7), в то время как у COSMO-Ru13ENA эта характеристика составляет примерно 80–100 км.

Отметим, что ранее для повышения успешности прогнозов приземных полей температуры и давления для COSMO-Ru7 разработчиками системы COSMO-Ru был включен ряд авторских модулей для дополнительного усвоения данных наблюдений. Аналогичные работы запланированы для конфигурации COSMO-Ru6ENA в том случае, если по результатам оперативных испытаний будет выявлено более высокое качество прогнозов у COSMO-Ru7, чем по COSMO-Ru6ENA.

В рамках создания технологии выпуска прогнозов по COSMO-Ru6ENA разработчиками был выполнен большой объем работ по развитию системы формирования графической продукции и размещения ее на специализированном сайте продукции системы COSMO-Ru [<https://u2019.meteoinfo.ru/services/cfo>]. Продукция COSMO-Ru6ENA предназначена для использования в качестве основы для составления краткосрочных прогнозов погоды (на ближайшие 3 суток от момента их выпуска) по зонам ответственности всех УГМС Росгидромета и главным образом предоставляется в виде прогностических карт метеопараметров (и их совокупности), графиков прогнозов по пунктам (метеограмм) и аэрологических диаграмм. Другое важное назначение продукции COSMO-Ru6ENA – формирование необходимых полей для вложенных конфигураций с меньшим шагом сетки, в первую очередь для конфигурации COSMO-Ru2By с шагом 2,2 км (для Белоруссии и ЕТР) [10]. Примеры графической продукции COSMO-Ru6ENA показаны на рис. 3, 4.

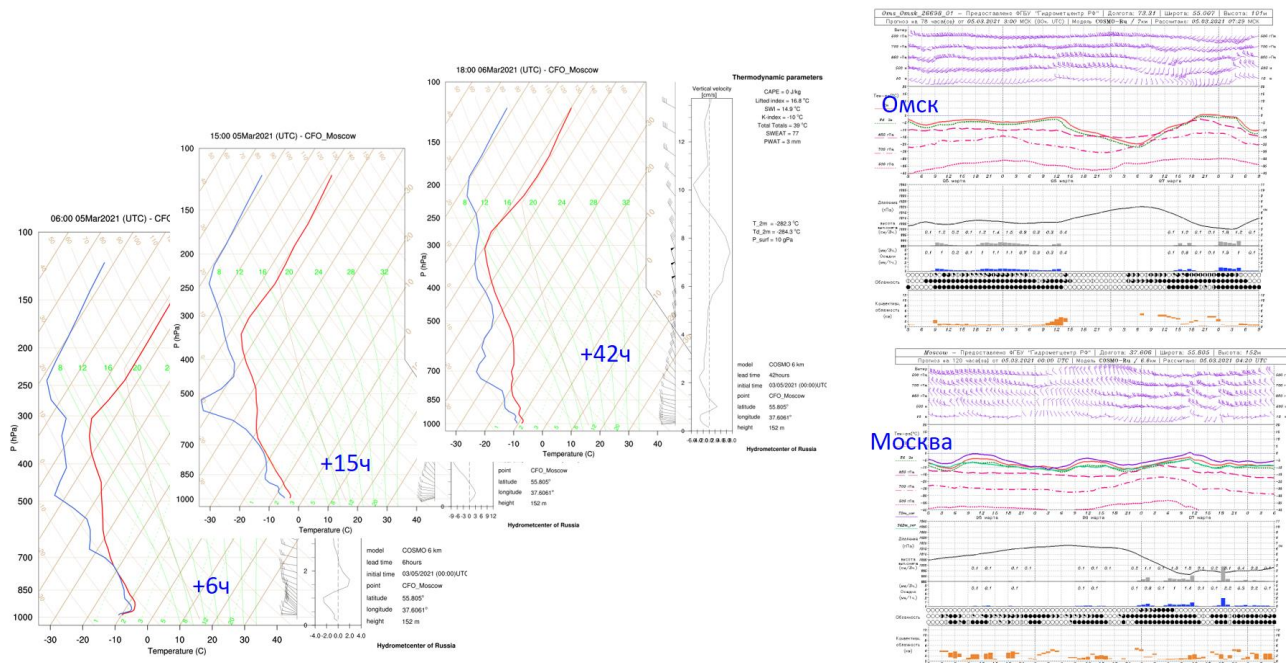


Рис. 3. Примеры графической продукции COSMO-RuBENA для пунктов.
 Слева: последовательность прогностических аэрологических диаграмм для Москвы (выпуск по 10 пунктам в России, шаг по времени 3 ч), метеограммы до 72 часов для Москвы и Омска (выпуск для более 200 пунктов в России).

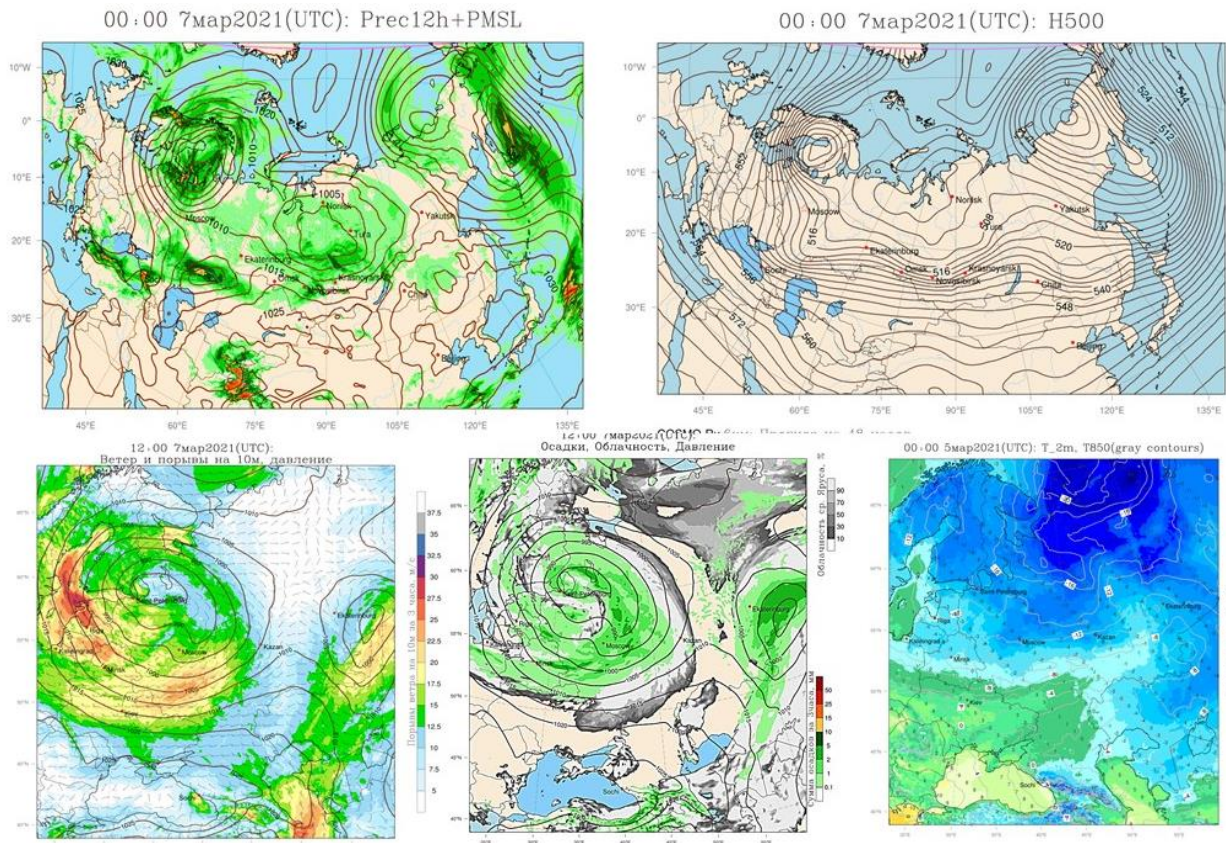


Рис. 4. Примеры электронных карт COSMO-RuBENA: сверху – для всей России (слева – давление на у.м.+ суммы 12-часовых осадков, справа – высота уровня 500 гПа); внизу (с более высокой подробностью изображений) – для региона ЕТР: порывы ветра; 3-часовые суммы осадков, облачность; температура воздуха на высоте 2 м (комплекты карт формируются для 7 регионов России).

Помимо готовых электронных карт, технология COSMO-Ru6ENA формирует файлы GRIB2 на материнской и на регулярной географической широтно-долготной сетках с составом продукции, определяемым в соответствии с видами оперативно- производственной деятельности Гидрометцентра России, либо по согласованию с конкретными пользователями. Одним из важных видов продукции являются подготовленные для дальнейших передач по каналам связи поля свободной атмосферы и ключевых метеопараметров у земной поверхности на регулярной широтно-долготной сетке с шагом 0.5° для распространения по каналам связи ВМО в соответствии с регламентами ГСОДП ВМО [14]. Ожидаемая детализация прогнозирования погодных явлений связана с циркуляционными процессами с минимальным масштабом 40–50 км. Основные характеристики системы COSMO-Ru6ENA в течение периода испытаний приведены в таблице.

Таблица

Характеристики технологической системы выпуска численных краткосрочных прогнозов погоды COSMO-Ru6ENA

Начальные условия	ICON (DWD)
Граничные условия	ICON (DWD)
Шаг по времени в секундах	50
Шаг сетки по горизонтали	~ 6.6 км
Количество узлов X,Y	2000×1000
Размер счёта, км	11 542×6 632
Количество уровней	40
Срок начальных данных, ч ВСВ	00, 06, 12, 18
Заблаговременность прогноза в часах	120 (78)
Количество ядер «Росгидромет»	1944
Время счёта в минутах	80/50
Начало счёта после срока наблюдения	2:55
Готовность результатов после срока наблюдения	4:15/3:45
Продолжительность визуализации, мин	85
Время начала –окончания визуализации, ч:мин	4:15 – 5:40
Количество ядер для визуализации	18

2. Характеристика проведения испытаний

К испытаниям были предложены прогнозы за 2020 год с заблаговременностями от 12 до 84 часов, стартовавшие от 00 ч ВСВ. Были рассчитаны показатели успешности по конфигурации COSMO-Ru6ENA в сравнении с прогнозами по конфигурациям COSMO-Ru13ENA и COSMO-Ru7. Кроме того, было произведено сравнение с показателями

глобальных моделей: российских (версии модели ПЛАВ, функционирующей в Гидрометцентре России) и пяти зарубежных на различных сетках продукции: США (NCEP, модель GFS, 1.25°), Немецкой метеослужбы (DWD, модель ICON, 0.25°), Японской метеослужбы (JMA, модель GSM, 1.25°), метеослужбы Великобритании (UKMO, 1.25°), Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF, 0.5°), доступные для технологий для просмотра результатов на картах синоптиками ММЦ «Москва» (кроме продукции ICON с указанными параметрами, доступной только для технологий цифровой обработки). Кроме того, для температуры, ветра и осадков проводилось сопоставление и с результатами комплексного прогноза (много модельный прогноз по пунктам, основанный на технологии нейронных сетей [2, 4]).

Показатели успешности прогнозов рассчитывались на основе сопоставления с данными метеорологических наблюдений сети метеостанций и данными радиозондирования с полями объективного анализа Гидрометцентра России на сетке 0.5°×0.5°. Были представлены оценки, осредненные за указанные периоды в целом, и оценки по осредненным показателям для теплого (май–сентябрь) и холодного (январь–март, октябрь–декабрь) периодам для более подробного сравнения конфигураций COSMO-Ru-ENA6, COSMO-Ru13ENA и COSMO-Ru7.

Оперативные испытания модели COSMO-Ru6ENA проводились для всей территории России. Для вычисления показателей успешности приземной погоды было выделено три домена вычисления оценок (рис. 5):

Европейская территория России (27° – 57° в. д.);

Урал и Западная Сибирь (57° – 90° в. д.);

Восточная Сибирь и Дальний Восток (восточнее 90° в. д.)

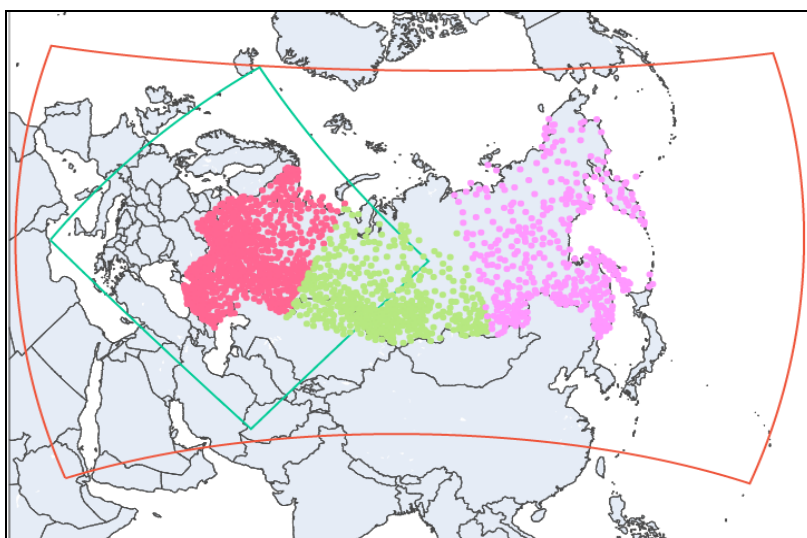


Рис. 5. Область вычислений COSMO-Ru6ENA (красный контур) и области вычисления и осреднения оценок прогнозов приземной погоды в пунктах наблюдения: красные точки – регион ЕТР; светло-зеленые – Урал и Западная Сибирь; лиловые – Восточная Сибирь и Дальний Восток.

Для каждого из трех вышеуказанных больших регионов России привлекались проконтролированные данные примерно с 750, 500 и 400 синоптических станций соответственно. Заметим, что для оценки порывов ветра и осадков примерно 3 % этих станций были отсеяны как содержащие недостоверную информацию.

3. Результаты испытаний

3.1. Анализ оценок прогнозов элементов приземной погоды по пунктам

Анализ оценок показал следующее:

– прогнозы **давления на уровне моря** по всем оцениваемым регионам России (см. рис. 5) по модели COSMO-RuENA6 превосходили по успешности прогнозы по модели COSMO-Ru13NA и были примерно на уровне PLAV20, однако уступали прогнозам глобальных иностранных моделей NCEP и DWD;

– прогнозы **приземной температуры воздуха по всем оцениваемым регионам России** модели COSMO-Ru6ENA заметно превосходили по успешности прогнозы по модели PLAV20 и несколько превосходили прогнозы COSMO-Ru13ENA, были близки по качеству прогнозам зарубежных глобальных моделей, однако уступали прогнозам ICON (рис. 6). Отметим, что для домена оценок «Восточная Сибирь и Дальний Восток» оценки прогнозов COSMO-RuENA6 оказались значимо лучше оценок NCEP;

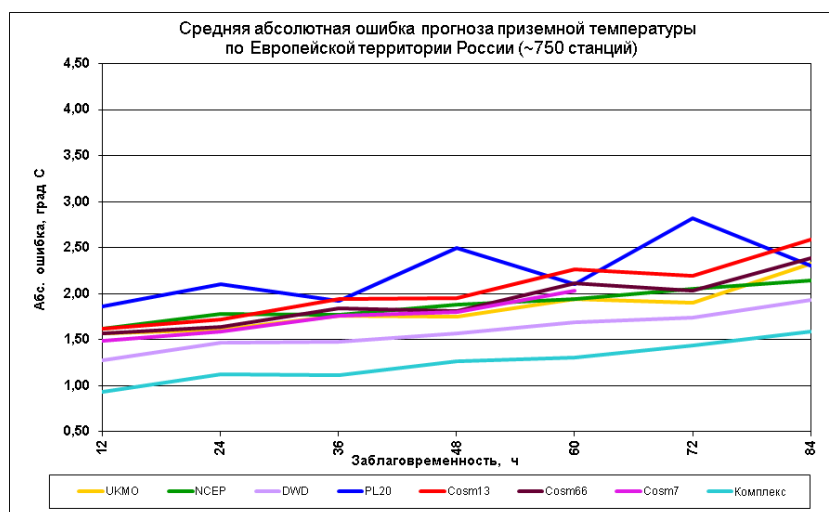


Рис. 6. Осредненные значения абсолютной ошибки прогнозов приземной температуры воздуха для домена «ЕТР».

– прогнозы фоновое **приземного ветра** COSMO-Ru6ENA по всем территориям оказались несколько лучше прогнозов COSMO-Ru13ENA и были близки по качеству прогнозам UKMO, NCEP, PLAV20 и DWD, но хуже прогнозов JMA (Япония) для доменов оценок «ЕТР» и «Урал и Западная Сибирь»;

– прогнозы **порывов ветра** оценивались в трех градациях: слабые (≥ 12 м/с), умеренные (≥ 18 м/с) и сильные (≥ 24 м/с). Учитывая высокую пространственно-временную изменчивость данных явлений, к оценке успешности привлекались порывы ветра на станции, наблюдавшиеся в интервале ± 3 часа от заблаговременности прогноза (12 ч). Были проанализированы результаты прогнозов NCEP, COSMO-Ru13ENA, COSMO-Ru6ENA, DWD и комплексного прогноза для домена «ЕТР». Оказалось, что прогнозы COSMO-Ru13ENA, COSMO-Ru6ENA и DWD по всем градациям порывов ветра близки по успешности. Однако предупреденность для модели COSMO-Ru6ENA оказалась выше. Прогнозы порывов ветра модели NCEP заметно уступают другим моделям. Заметим, что сильные летние (как правило, возникающие в результате конвекции) порывы ветра в градации свыше 24 м/с все модели прогнозируют неудовлетворительно;

– оценки **прогнозов 12-часовых сумм осадков** с заблаговременностью до 42 ч проводились для домена «ЕТР» (рис.7). Расчет оценок осадков проводился по методике, описанной в [15]. При этом выпавшие осадки подразделяются на 6 градаций в зависимости от их количества и фазы. Оценки всех конфигураций модели COSMO оказались близкими по успешности между собой и к модели DWD, которая оказалась лучшей из глобальных моделей. При этом COSMO-Ru6ENA по показателям средней (близкой к нулю) и абсолютной ошибки (0.7–0.8 мм), а также оправдываемости отсутствия явления не уступила ни одной из участвующих в сравнении моделей, а по общей оправдываемости «пропустила вперед» на заблаговременности 30 часов только результаты для ICON, и то только на 1 % (88 % против 89 %).

У	Б/ос	Слаб	Небол	Умер	Силь	Оч.сил.				
дождь	0	0-0.2	0.3-3	4-9	10-29	≥ 30				
снег	0	0-0,1	0,2-1	2-5	6-15	≥ 16				
	165464	20107	43012	20735	1790	296	BIAS	ABS	NN	
86.	88.	87.	82.	80.	60.	26.	0.5	0.9	252073	UKMO
87.	90.	86.	81.	78.	59.	16.	0.2	0.8	247796	NCEP
89.	94.	86.	80.	73.	54.	15.	0.0	0.7	250689	DWD
89.	93.	89.	82.	75.	52.	12.	0.0	0.7	250687	ECMW
87.	91.	87.	81.	75.	50.	16.	0.2	0.8	237284	PLAV20
88.	95.	85.	77.	68.	48	16.	0.0	0.7	250651	Cosm-7
88.	94.	85.	77.	66.	47.	16.	0.0	0.8	242214	Cosm-13
88.	95.	85.	78.	69.	53.	20.	0.0	0.7	235719	Cosm-6,6
91.	96.	87.	82.	77.	54.	16.	0.1	0.5	251298	Компл.

Рис. 7. Пример результатов оценок 12ч сумм осадков в соответствии с [15].

Заметим, что успешность модельных прогнозов осадков, структурированных по градациям, в соответствии с предложенной [15] методикой оценки формулировок синоптиков, серьезно ухудшается по мере увеличения количества осадков. Так, выяснилось,

что осадки для интервалов формулировок «сильные» и «очень сильные» осадки в летний период все модели прогнозируют с низкой общей оправдываемостью.

Отметим, что комплексный прогноз температуры, фонового приземного ветра, порывов ветра и осадков оказался лучше всех других численных прогнозов.

В сравнении с результатами конфигураций региональной модели COSMO-Ru13ENA, COSMO-Ru7 разработчиками выявлено:

– для прогнозов **12-часовых сумм осадков** по традиционным показателям успешности, рекомендованным ВМО [5], результаты по всем трем конфигурациям для домена оценок «ЕТР» оказались близкими, с попеременным превосходством COSMO-Ru6ENA, COSMO-Ru7 над успешностью COSMO-Ru13ENA; для доменов «Урал и Западная Сибирь», «Восточная Сибирь и Дальний Восток» выявилось систематическое превосходство COSMO-Ru6ENA над успешностью COSMO-Ru13ENA. При этом для факта выпадения осадков (суммы свыше 0.1 мм) значения показателей оказались близкими для различных регионов, а также холодного и теплого периодов года, и уменьшались с увеличением заблаговременности для значений критерия Пирси – Обухова от 0.67 до 0.48, для ETS – от 0,41 до 0,28. Для 12-часовых сумм осадков свыше 5 мм для холодного периода максимальные значения критерия Пирси – Обухова составляли 0.60, минимальные – 0.4, для ETS – 0,35 и 0,28 соответственно; а для теплого периода для критерия Пирси – Обухова – от 0.56 до 0,18, и для ETS – от 0,35 до 0,1 (максимальные и минимальные по всем регионам и заблаговременностям). Самая высокая успешность в градации свыше 5 мм/12ч в летний период фиксировалась в регионе Восточной Сибири и Дальнего Востока (рис. 8).

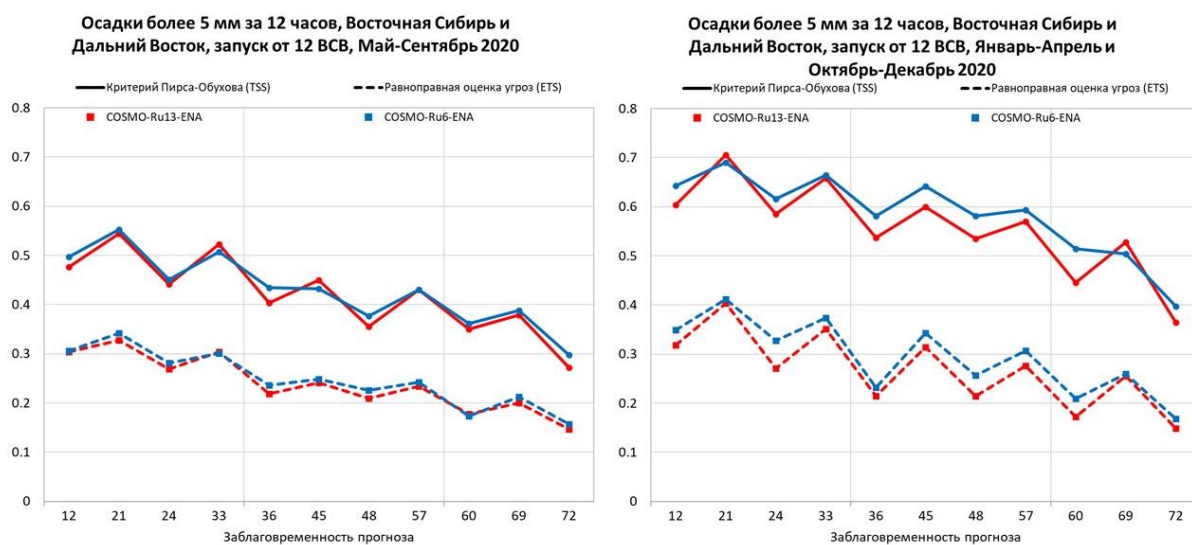


Рис. 8. Успешность прогноза фактов осадков свыше 5мм/12ч для домена «Восточная Сибирь и Дальний Восток» за теплый и холодный периоды года по COSMO-Ru6ENA (синий) и COSMO-Ru13ENA (красный).

Порывы ветра прогнозировались COSMO-Ru6ENA также более успешно, чем по COSMO-Ru13ENA (рис. 9).

Для прогнозов температуры воздуха по домену оценок «ЕТР» все версии имели близкие результаты, однако в отдельные заблаговременности прогнозы конфигурации COSMO-Ru7 имели меньшие значения RMSE в сравнении с COSMO-Ru6ENA и COSMO-Ru13ENA, до 0.2° по домену оценок «ЕТР» и до 0.5° по домену «Урал и Западная Сибирь», частично охватываемому вычислениями COSMO-Ru7 (рис. 10).

Для прогнозов давления на уровне моря по домену оценок «ЕТР» конфигурация COSMO-Ru7 также имела для отдельных заблаговременностей немного более высокую успешность (при годовом осреднении – до 0,2 гПа), чем COSMO-Ru6ENA.

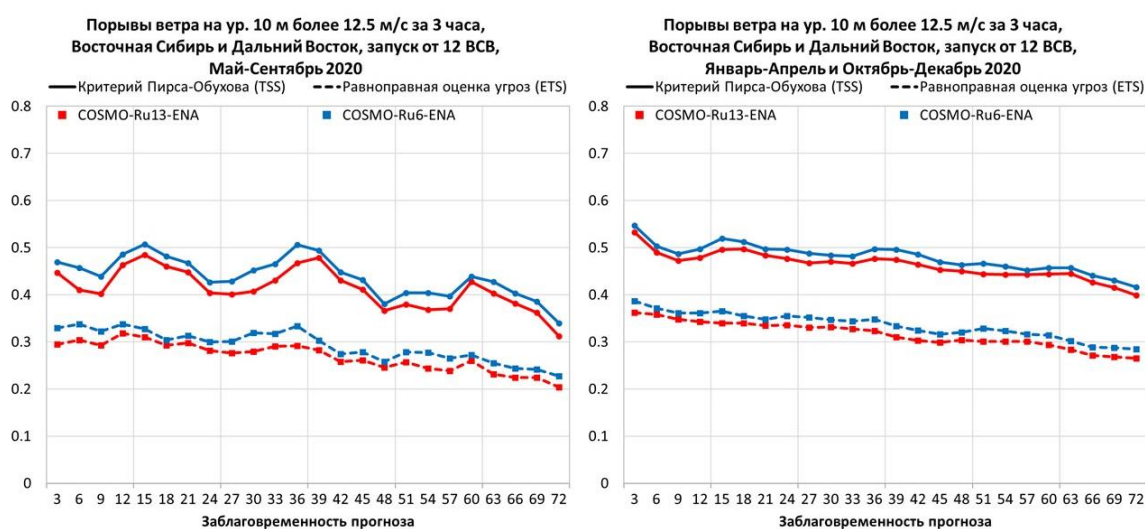


Рис. 9. Примеры графиков соотношения успешности прогнозов для градации порывов ветра свыше 12 м/с для домена оценок «Восточная Сибирь и Дальний Восток» за теплый и холодный периоды года по COSMO-Ru6ENA (синий) и COSMO-Ru13ENA (красный).

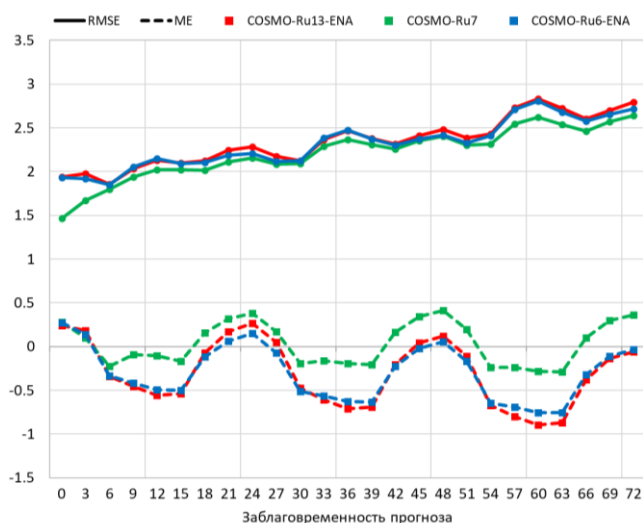


Рис. 10. Соотношение среднегодовых показателей успешности прогнозов приземной температуры воздуха для домена «ЕТР» по COSMO-Ru7 (зеленый), COSMO-Ru6ENA (синий), COSMO-Ru13ENA (красный).

Таким образом, результаты испытаний подтверждают целесообразным учесть опыт реализации алгоритмов усвоения данных в COSMO-Ru7 при дальнейшем развитии COSMO-Ru6ENA и/или последующих конфигураций моделей ICON/COSMO. В то же время COSMO-Ru6ENA показала преимущество либо близкие результаты в сравнении с COSMO-Ru13ENA, что говорит о целесообразной замене на COSMO-Ru6ENA.

3.2. Анализ оценок прогнозов в узлах сетки

Расчеты оценок полей в свободной атмосфере на территории **Европы** проведены по полям объективного анализа $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, а также по отконтролированным данным 89 аэрологических станций, расположенных на территории Европы. Последние расчеты были проведены в период с июня по декабрь 2020 г. Они представляются нам более достоверными. Участвовали в оценке модели: UKMO, NCEP, PLAV20, DWD, COSMO-Ru13ENA, COSMO-Ru6ENA. По данным станций рассчитывались среднеквадратические ошибки полей H850, H500, H250 и T850, а также среднеквадратические векторные ошибки поля ветра на уровне 250 гПа. Заблаговременность прогнозов – до 72 ч с шагом 24 ч, исходный срок 00 ч ВСВ.

При этом во всех случаях результаты прогнозов COSMO-Ru6ENA оказались несколько лучше, чем COSMO-Ru13ENA, и практически во всех случаях лучше, чем по модели PLAV20. Однако выявлено отставание от результатов зарубежных глобальных моделей. Примеры успешности прогнозов для уровня 250 гПа, наиболее важном для обслуживания авиации, приведены на рис. 11, 12.

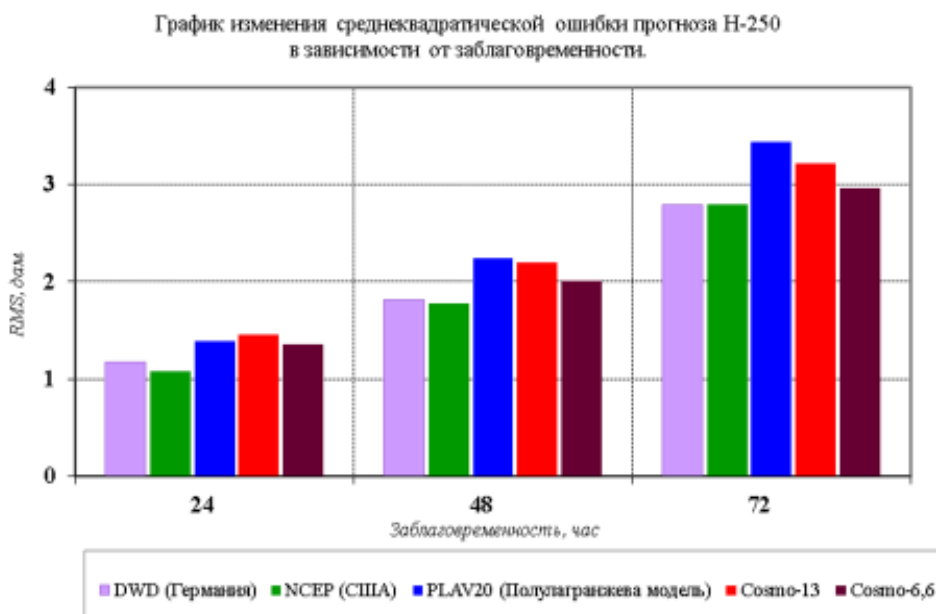


Рис. 11. Графики успешности прогнозов в узлах сетки (сравнение с результатами объективного анализа Гидрометцентра России) для высоты поверхности 250 гПа.

График изменения среднеквадратической векторной ошибки прогноза ветра W-250 в зависимости от заблаговременности.

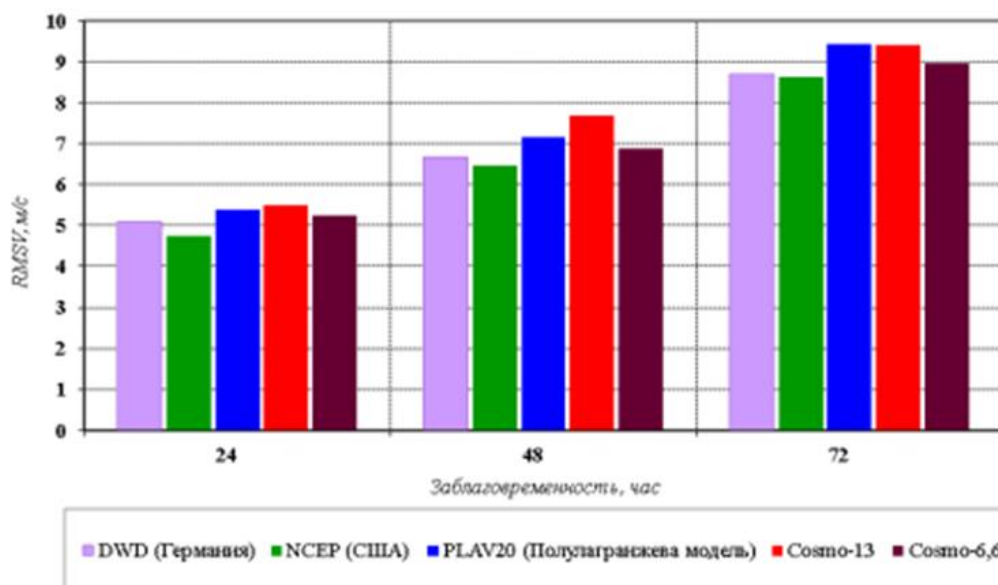


Рис. 12. Графики успешности прогнозов в узлах сетки (сравнение с результатами радиозондирования) для скорости ветра на поверхности 250 гПа.

4. Выводы (по тексту Решения ЦМКП от 11 марта 2021 года)

4.1. ЦМКП считает целесообразным:

– одобрить работу ФГБУ «Гидрометцентр России» по развитию методов численного прогнозирования погоды высокого разрешения на основе негидростатической модели атмосферы COSMO-Ru6ENA.

4.2. ЦМКП рекомендует:

– внедрить в ФГБУ «Гидрометцентр России» в оперативную практику краткосрочных прогнозов элементов погоды по территории России модель COSMO-Ru6ENA в качестве основной наряду с ранее внедренными базовыми для Центрального федерального округа и Северного Кавказа COSMO-2,2 (шаг сетки 2.2 км);

– исключить из оперативной практики модели COSMO-Ru13ENA и COSMO-Ru7;

– оперативно-прогностическим подразделениям Росгидромета использовать численные прогнозы погоды по COSMO-Ru6ENA взамен COSMO-Ru13ENA в качестве основного расчетного метода наряду с уточняющими региональными (локальными) методами при выпуске официальных краткосрочных прогнозов погоды;

– ФГБУ «Гидрометцентр России» обеспечить выпуск и распространение продукции в сетевые прогностические организации Росгидромета в виде готовых графических файлов и сообщений GRIB на основе расчетов COSMO-Ru6ENA;

– при развитии COSMO-Ru6ENA и/или последующих конфигураций технологической линии системы COSMO-Ru учесть опыт реализации алгоритмов усвоения данных, используемый в COSMO-Ru7, приведший к более высоким оценкам прогнозов приземной температуры и давления для ЕТР.

Список литературы

1. *Багров А.Н.* Результаты оперативных испытаний мезомасштабной модели COSMO-Ru13 // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2020. – Информационный сборник № 47. – С. 3–21.

2. *Багров А.Н., Быков Ф.Л., Гордин В.А.* Схема оперативного краткосрочного комплексного прогноза приземной температуры и влажности воздуха // *Метеорология и гидрология.* – 2018. – № 8. – С. 5–18.

3. *Блинов Д.В., Ривин Г.С.* Система краткосрочного негидростатического прогноза погоды COSMO-Ru: технологическая линия // *Труды Гидрометцентра России.* – 2017. – Вып. 365. – С. 142–162.

4. *Быков Ф.Л.* Статистическая коррекция прогнозов погоды по модели COSMO с помощью нейронных сетей // *Метеорология и гидрология.* – 2020. – № 3. – С. 5–20.

5. *Киктев Д.Б., Муравьев А.В., Бундель А.Ю.* Методические рекомендации по верификации метеорологических прогнозов – М.: АМА ПРЕСС, 2021. – 94 с.

6. *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.,* Система численного прогнозирования явлений погоды, включая опасные, для Московского мегаполиса: разработка прототипа // *Метеорология и гидрология.* – 2019. – № 11. – С. 33–45.

7. *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.

8. *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.

9. *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., Полюхов 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.

10. 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-RuBy (Гидрометцентр России) и WRF-ARW (Белгидромет) для краткосрочного прогноза погоды // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2021. – № 4 (382). – С. 6–30.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. ВМО-№ 485. Наставление по Глобальной системе обработки данных и прогнозирования. – 2017. – 160 с.

15. РД 52.27.724–2019. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. – 66 с.