

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-4-52-73>

УДК 504.3.054+504.06+551.509.51

Сравнение прогнозов температуры и скорости ветра по конфигурациям системы COSMO-Ru/icon на ЕТР за 6 месяцев 2025 года и в эпизоде неблагоприятных метеорологических условий в Москве

А.П. Ревокатова, И.Н. Кузнецова, А.А. Кирсанов

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
revokatova@gmail.com*

Действующая в Гидрометцентре России технология прогнозирования метеорологического показателя рассеивания загрязнений (МППЗ) основана на использовании прогнозов конфигурации COSMO-Ru6ENA. В связи с переходом на применение прогнозов системы ICON-Ru с шагом горизонтальной сетки 6 км проведены сравнения модельных расчетов температуры и ветра на изобарических поверхностях 1000, 925 и 850 гПа двух конфигураций COSMO-Ru6ENA и ICON-Ru13/6N29 с данными радиозондирования на ЕТР. Установлено преимущество прогнозов ICON-Ru по сравнению с COSMO-Ru на тестируемой выборке. Совместный анализ прогнозов метеорологических характеристик ICON-Ru с данными наблюдений на Останкинской телебашне и в пункте радиозондирования выявил характерные особенности прогнозов вертикальных профилей температуры и скорости ветра, имеющие практическое значение для прогнозирования условий рассеивания примеси. Верификация прогнозов МППЗ проводилась по данным измерений концентраций загрязнений на телебашне и измерений на наземных станциях контроля ГПБУ «Мосэкомониторинг» для эпизода неблагоприятных метеорологических условия в конце марта 2025 года. Результаты подтверждают связь МППЗ-1 типа (слабое рассеивание) с повышением концентраций загрязняющих веществ на станциях городского типа и указывают на обоснованность использования данных системы ICON-Ru для прогноза МППЗ.

Ключевые слова: неблагоприятные метеорологические условия, метеорологический показатель рассеивания загрязнений (МППЗ), верификация, загрязнение атмосферы, ICON-Ru, COSMO-Ru

Comparison of temperature and wind speed forecasts for the COSMO-Ru/icon configurations in the European part of Russia for six months of 2025 and during the episode of adverse meteorological conditions in Moscow

A.P. Revokatova, I.N. Kuznetsova, A.A. Kirsanov

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia
revokatova@gmail.com*

The current technology for forecasting the meteorological indicator of pollution dispersion (MIPD) used at the Hydrometcentre of Russia is based on the COSMO-Ru6ENA configuration forecasts. Due to the transition to using ICON-Ru system forecasts with a 6 km

horizontal grid spacing, model calculations of temperature and wind at the levels of 1000, 925, and 850 hPa for the COSMO-Ru6ENA and ICON-Ru13/6N29 configurations were compared with radiosonde data over the European Part of Russia. An advantage of ICON-Ru forecasts over COSMO-Ru was revealed using the test sample. A joint analysis of ICON-Ru forecasts of meteorological characteristics with observational data from the Ostankino TV Tower and a radiosonde station revealed characteristic features of the forecasts of temperature and wind speed profiles. These results are of practical importance for predicting pollution dispersion conditions. The results of the MIPD forecast verification using pollutant concentration measurements at the TV tower and Mosekomonitoring surface monitoring stations during the episode of adverse meteorological conditions at the end of March 2025 confirmed the connection of type 1 MIPD (weak dispersion) with increased pollutant concentrations at urban-type stations and indicated reasonability of using the ICON-Ru system data for MIPD forecasting.

Keywords: adverse meteorological conditions, meteorological indicator of pollution dispersion (MIPD), verification, atmospheric pollution, ICON-Ru, COSMO-Ru

Введение

Установленные связи концентраций загрязняющих веществ в приземном воздухе с метеорологическими факторами являются основой для разработки статистических методов прогнозирования метеорологических условий, способствующих повышению уровня загрязнения. Разработка таких методов с применением комплексного метеорологического показателя рассеивания загрязнений (МППЗ) является традиционным направлением исследований в Гидрометцентре России [4]. Использование численных прогнозов метеорологических характеристик в атмосферном пограничном слое (АПС) обеспечило прогнозирование МППЗ на двое суток вперед с часовым шагом и с осреднением для характерных внутрисуточных периодов – ночь, утро, день, вечер [4, 8].

При расчете МППЗ применяются прогностические данные активно развивающихся в Гидрометцентре России численных моделей атмосферы с высоким пространственным и временным разрешением [6, 7]. Для прогнозирования неблагоприятных метеорологических условий (НМУ) реализована технология подготовки необходимой для расчетов МППЗ метеорологической информации с использованием данных конфигурации COSMO-Ru6ENA по исходным срокам 00 и 12 ч ВСВ [4, 8]. В связи с тем, что в настоящее время осуществляется переход с конфигурации COSMO-Ru6ENA модели COSMO на конфигурацию ICON-Ru13/6N29 модели ICON с шагом сетки по горизонтали 6 км (далее – ICON-Ru), имеющей более совершенные динамический и физический блоки, необходимо оценить качество воспроизводимых ICON-Ru метеорологических характеристик, задействованных в расчете МППЗ. При том, что регулярные стандартные оценки качества модельных расчетов ежемесячно приводятся на сайте Гидрометцентра России (<https://method.meteorf.ru/estimate/estimate.html>), проводятся также и авторские испытания для более подробной оценки успешности прогноза отдельных характеристик [3].

1. Методы

МПРЗ является функцией количественной величины температурной стратификации (градиента), средней скорости ветра в АПС, осадков и адвективных изменений температуры [4], поэтому важно оценить качество воспроизведения ICON-Ru температуры и ветра у поверхности и на вертикальных уровнях. Эта работа разделена на две части: в первой части представлены оценки прогноза полей температуры и скорости ветра на уровнях 1000, 925 и 850 гПа при помощи пакета METplus [9] за 6 месяцев (в отдельности за каждый, с января по июнь 2025 г.). Целью этой работы было в первую очередь выявление основных закономерностей изменения ошибок в зависимости от срока старта прогноза (рассматривались все прогнозы, стартовавшие от 0, 6, 12, 18 ч), в зависимости от заблаговременности (12–48 ч) и от сезона, а также сравнение прогнозов конфигураций систем COSMO-Ru и ICON-Ru между собой.

Вторая часть работы посвящена “case-study” – изучению конкретного случая НМУ в марте 2025 года. Приводятся данные прогнозов температуры и скорости ветра на стандартных вертикальных уровнях в конфигурациях COSMO-Ru6ENA и ICON-Ru13/6N29 и их сравнение с данными радиозондирования и контактных измерений на Останкинской телебашне, подчеркиваются внутрисуточные особенности формирования температурного профиля – инверсий и конвективных условий.

Оценки считались для ICON-Ru13/6N29 и COSMO-Ru6ENA с шагом сетки по горизонтали 6 км. Для верификации на вертикальных уровнях (1000, 925 и 850 гПа) пакет METplus использует данные радиозондов. Прогностические данные интерполируются с модельной сетки в точки станций с помощью билинейной интерполяции.

2. Результаты

2.2. Оценки прогнозов температуры и скорости ветра по COSMO-Ru и ICON-Ru

Температура воздуха

В табл. 1 приведены значения средней абсолютной ошибки MAE (Mean Absolute Error) для температуры воздуха на уровне 1000 гПа с января по июнь 2025 г. для территории ЕТР. Видно, что в большинстве случаев прогнозы по ICON-Ru оказались более успешными, единичные случаи, когда MAE COSMO-Ru была меньше, выделены в таблице жирным шрифтом. Выделяются прогнозы от 12 ч: с января по июнь для всех прогнозов температуры на 1000 гПа MAE по ICON-Ru немного больше, чем по COSMO-Ru. Это справедливо для заблаговременности прогноза 12 ч для всех месяцев, для заблаговременности 24 ч в феврале, для заблаговременности 36 ч в феврале, апреле, мае и июне, для заблаговременности 48 ч в мае и июне.

Это может быть связано как с начальными условиями, так и с особенностями подстилающей поверхности в модели, в частности, с наличием или отсутствием снежного покрова в весенние месяцы. Однако важно будет заметить, что разницы в ошибках между COSMO-Ru и ICON-Ru в этот срок относительно небольшие и варьируют от 0.01 до 0.27, что заметно меньше, чем разницы в значениях MAE в те сроки, когда прогноз по ICON-Ru лучше. В мае 2025 г. прогнозы по ICON-Ru отличались более высокими ошибками в полях температуры, чем в остальные месяцы. В целом наблюдается тенденция к увеличению ошибки по мере увеличения заблаговременности прогноза.

Таблица 1. Средняя абсолютная ошибка прогноза температуры MAE на уровне 1000 гПа. Январь–июнь 2025 г., конфигурации COSMO-Ru6ENA (COSMO) и ICON-Ru13/6N29 (ICON)

Table 1 Mean Absolute Error of temperature forecast (MAE) at the 1000 hPa level. January-June 2025, configurations COSMO-Ru6ENA (COSMO) and ICON-Ru13/6N29 (ICON).

Заблаговременность	Месяц	Срок старта прогноза							
		0 ч		6 ч		12 ч		18 ч	
		COSMO	ICON	COSMO	ICON	COSMO	ICON	COSMO	ICON
6 ч	I			1.27	1.09			1.12	1.09
	II			1.34	1.22			1.15	1.14
	III			1.72	1.37			1.58	1.61
	IV			1.27	1.32			1.58	1.62
	V			1.40	1.33			1.63	1.85
	VI			1.32	1.13			1.42	1.56
12 ч	I	1.33	1.16			1.25	1.32		
	II	1.35	1.26			1.31	1.4		
	III	2.4	1.6			1.58	1.8		
	IV	1.68	1.45			1.53	1.63		
	V	1.7	1.42			1.55	1.85		
	VI	1.38	1.2			1.45	1.6		
18 ч	I			1.12	1.1			1.44	1.21
	II			1.25	1.12			1.44	1.38
	III			1.79	1.75			2.41	2.62
	IV			1.64	1.66			1.69	1.54
	V			1.59	1.85			1.62	1.45
	VI			1.42	1.53			1.4	1.23
24 ч	I	1.43	1.44			1.49	1.3		
	II	1.62	1.58			1.44	1.45		
	III	1.9	1.7			1.82	1.55		
	IV	1.76	1.7			1.65	1.55		
	V	1.68	1.82			1.6	1.6		
	VI	1.42	1.55			1.5	1.33		

Заблаговременность	Месяц	Срок старта прогноза							
		0 ч		6 ч		12 ч		18 ч	
		COSMO	ICON	COSMO	ICON	COSMO	ICON	COSMO	ICON
30 ч	I			1.25	1.21			1.54	1.54
	II			1.4	1.22			1.72	1.65
	III			2.41	1.79			1.86	1.8
	IV			2.06	1.82			1.76	1.62
	V			1.81	1.69			1.7	1.87
	VI			1.74	1.39			1.49	1.52
36 ч	I	1.61	1.31			1.59	1.55		
	II	1.76	1.62			1.64	1.67		
	III	2.95	1.9			1.78	1.9		
	IV	2.22	1.85			1.68	1.68		
	V	2.03	1.73			1.68	1.95		
	VI	1.98	1.48			1.47	1.65		
42 ч	I			1.36	1.26			1.64	1.4
	II			2.09	1.88			1.79	1.68
	III			1.96	1.83			3.01	1.94
	IV			1.76	1.6			2.22	1.84
	V			1.81	1.84			1.95	1.72
	VI			1.56	1.53			1.96	1.6
48 ч	I	1.65	1.57			1.61	1.42		
	II	1.92	1.82			1.75	1.7		
	III	2.3	1.9			2.42	1.9		
	IV	1.8	1.6			2.2	1.82		
	V	1.98	2.03			1.8	1.81		
	VI	1.62	1.6			2.02	1.66		

В табл. 2 приведены значения MAE для температуры воздуха на уровне 925 гПа для территории ЕТР. В большинстве случаев прогнозы по ICON-Ru оказались более успешными. Сроки, для которых это неверно, выделены жирным шрифтом. Видно, что в большинстве своем это случаи с заблаговременностью 6, 12, 18 ч в теплый период. И разница между моделями составляет обычно сотые доли. Общей закономерностью является уменьшение MAE на уровне 925 гПа по сравнению с уровнем 1000 Па.

Ход среднего за 6 месяцев MAE температуры для запусков прогноза (init time) 0 и 12 ч ВСВ в зависимости от заблаговременности представлен на рис. 1. На уровне 1000 гПа (рис. 1а) ошибка на срок 00 ч при малых заблаговременностях прогноза (до 18 ч) по COSMO-Ru меньше, чем по ICON-Ru, при заблаговременности от 24 до 32 ч ошибки примерно одинаковые, при прогнозе более, чем на 36 ч, прогнозы ICON-Ru показали большую точность.

Таблица 2. Средняя абсолютная ошибка прогноза температуры MAE на уровне 925 гПа. Январь-июнь 2025 г., конфигурации COSMO-Ru6ENA (COSMO) и ICON-Ru13/6N29 (ICON)

Table 2. Mean Absolute Error of temperature forecast (MAE) at the 925 hPa level. January-June 2025, configurations COSMO-Ru6ENA (COSMO) and ICON-Ru13/6N29 (ICON)

Заблаговременность	Месяц	Срок старта прогноза							
		0 ч		6 ч		12 ч		18 ч	
		COSMO	ICON	COSMO	ICON	COSMO	ICON	COSMO	ICON
6 ч	I			1.27	1.09			1.12	1.09
	II			1.34	1.22			1.15	1.14
	III			1.72	1.37			1.58	1.61
	IV			1.27	1.32			1.58	1.62
	V			1.40	1.33			1.63	1.85
	VI			1.32	1.13			1.42	1.56
12 ч	I	1.33	1.16			1.25	1.32		
	II	1.35	1.26			1.31	1.4		
	III	2.4	1.6			1.58	1.8		
	IV	1.68	1.45			1.53	1.63		
	V	1.7	1.42			1.55	1.85		
	VI	1.38	1.2			1.45	1.6		
18 ч	I			1.12	1.1			1.44	1.21
	II			1.25	1.12			1.44	1.38
	III			1.79	1.75			2.41	2.62
	IV			1.64	1.66			1.69	1.54
	V			1.59	1.85			1.62	1.45
	VI			1.42	1.53			1.4	1.23
24 ч	I	1.43	1.44			1.49	1.3		
	II	1.62	1.58			1.44	1.45		
	III	1.9	1.7			1.82	1.55		
	IV	1.76	1.7			1.65	1.55		
	V	1.68	1.82			1.6	1.6		
	VI	1.42	1.55			1.5	1.33		
30 ч	I			1.25	1.21			1.54	1.54
	II			1.4	1.22			1.72	1.65
	III			2.41	1.79			1.86	1.8
	IV			2.06	1.82			1.76	1.62
	V			1.81	1.69			1.7	1.87
	VI			1.74	1.39			1.49	1.52
36 ч	I	1.61	1.31			1.59	1.55		
	II	1.76	1.62			1.64	1.67		
	III	2.95	1.9			1.78	1.9		
	IV	2.22	1.85			1.68	1.68		
	V	2.03	1.73			1.68	1.95		
	VI	1.98	1.48			1.47	1.65		

Заблаговременность	Месяц	Срок старта прогноза							
		0 ч		6 ч		12 ч		18 ч	
		COSMO	ICON	COSMO	ICON	COSMO	ICON	COSMO	ICON
42 ч	I			1.36	1.26			1.64	1.4
	II			2.09	1.88			1.79	1.68
	II			1.96	1.83			3.01	1.94
	IV			1.76	1.6			2.22	1.84
	V			1.81	1.84			1.95	1.72
	VI			1.56	1.53			1.96	1.6
48 ч	I	1.65	1.57			1.61	1.42		
	II	1.92	1.82			1.75	1.7		
	II	2.3	1.9			2.42	1.9		
	IV	1.8	1.6			2.2	1.82		
	V	1.98	2.03			1.8	1.81		
	VI	1.62	1.6			2.02	1.66		

При прогнозе на 12 ч ВСВ (init time = 12) наблюдается ярко выраженное различие в MAE температуры между конфигурациями, по COSMO-Ru ошибки заметно больше. На уровне 925 гПа (рис. 16) прогнозы температуры на нулевой срок с заблаговременностью 6 ч лучше по COSMO-Ru, на 12 часов дня – по ICON-Ru.

Начиная с заблаговременности 12 ч и до 54 ч ICON-Ru стабильно лучше. MAE в полдень всегда больше, чем в полночь. На уровне 850 гПа различия между моделями уже не такие большие, но сохраняется основная тенденция: на 0 ч прогноз точнее, чем на 12 ч. По ICON-Ru ошибки всегда меньше, за исключением прогнозов на нулевой срок с заблаговременностью 6 и 18 ч.

Скорость ветра

Аналогичные оценки проведены для прогнозов скорости ветра, анализ которых позволяет сделать следующие основные выводы:

– в холодный период (январь, февраль) в большинстве случаев прогнозы скорости ветра на уровне 1000 гПа оказались более успешными по COSMO-Ru, в марте и апреле – примерно в половине случаев прогнозы ICON-Ru были лучше, а в теплый период (май, июнь) прогнозы по ICON-Ru были заметно лучше;

– прогнозы скорости ветра на уровне 925 гПа для первых 6 месяцев 2025 года для территории ЕТР в подавляющем большинстве случаев были лучше по ICON-Ru для всех сроков старта и всех заблаговременностей. В январе в 80 % прогнозы по ICON-Ru были лучше.

Ход среднего за 6 месяцев RMSE прогноза скорости ветра для сроков старта прогноза (init time) 0 и 12 ч в зависимости от заблаговременности представлен на рис. 2.

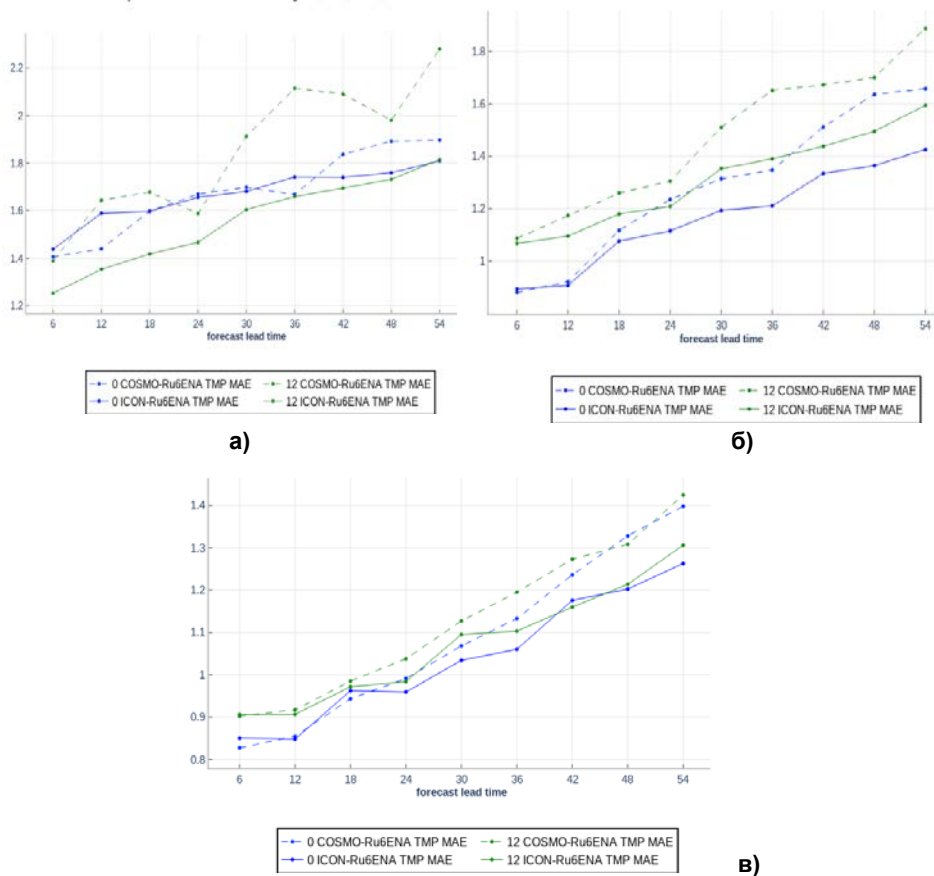


Рис. 1. Осредненная за период январь–июнь 2025 г. средняя абсолютная ошибка прогноза (MAE) температуры по исходному сроку 0 и 12 ч ВСВ с заблаговременностью до 54 час через 6 ч на уровнях: 1000 гПа (а); 925 гПа (б); 850 гПа (в). Конфигурации COSMO-Ru6ENA (COSMO) и ICON-Ru13/6N29 (ICON) с горизонтальным шагом сетки 6 км.

Fig. 1. Averaged over the period January – June 2025, Mean Absolute Error (MAE) of temperature forecast by initial time 0 and 12 UTC with lead times up to 54 hours in 6-hour increments at levels: 1000 hPa (а); 925 hPa (б); 850 hPa(в). Configurations COSMO-Ru6ENA (COSMO) and ICON-Ru13/6N29 (ICON) with a 6 km horizontal grid step.

На уровне 1000 гПа (рис. 2а) ошибка на срок 00 ч по COSMO-Ru больше, чем по ICON-Ru, а на 12-часовой срок, наоборот, меньше вплоть до 42 ч прогноза.

На уровне 925 гПа (рис. 2б) прогнозы скорости ветра на полночь и полдень лучше по ICON-Ru для всех заблаговременностей. То же самое верно и для уровня 850 гПа. В отличие от температуры, при прогнозах скорости ветра на всех уровнях ошибки на 12-часовой срок всегда заметно меньше, чем на нулевой срок.

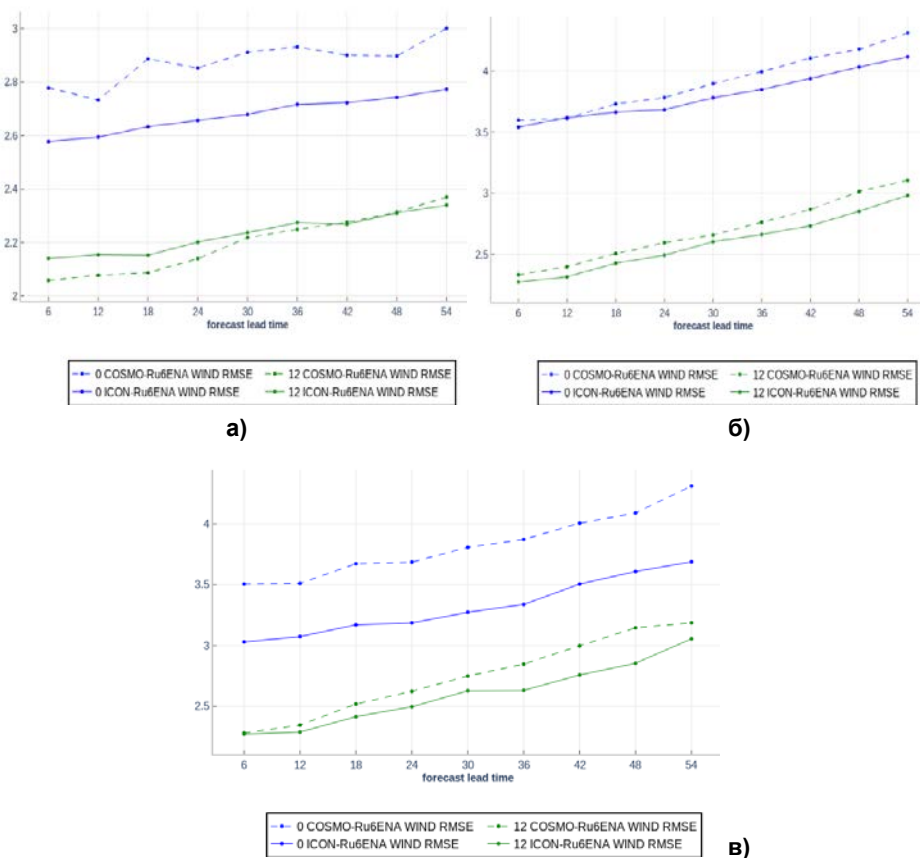


Рис. 2. Осредненная за период январь–июнь 2025 г. средняя квадратическая ошибка прогноза (RMSE) скорости ветра по исходному сроку 0 и 12 ч ВСВ с заблаговременностью до 54 час через 6 ч на уровнях: 1000 гПа (а); 925 гПа (б); 850 гПа (в). Конфигурации COSMO-Ru6ENA (COSMO) и ICON-Ru13/6N29 (ICON) с горизонтальным шагом сетки 6 км.

Fig. 2. Averaged over the period January – June 2025, Root Mean Square Error (RMSE) of wind speed forecast by initial time 0 and 12 UTC with lead times up to 54 hours in 6-hour increments at levels: 1000 hPa(а); 925 hPa (б); 850 hPa(в). Configurations COSMO-Ru6ENA (COSMO) and ICON-Ru13/6N29 (ICON) with a 6 km horizontal grid step.

2.2. Неблагоприятные метеорологические условия 28–31 марта 2025 года

В конце марта 2025 года в Московском регионе сформировались синоптические условия, благоприятные для накопления примесей, на большей части мегаполиса было зафиксировано повышение уровня загрязнения приземного воздуха (<https://mosecom.mos.ru/air-quality/>). Вначале (29 марта) погодные условия определял отрог казахского антициклона

со слабым ветром из южного сектора; эпизод НМУ закончился (31 марта) под влиянием южного циклона с дождями и усилением ветра местами до 12 м/с. Представленные на рис. 3 карты погоды на основе прогнозов ICON-Ru в деталях отражают особенности атмосферных процессов и их смену в эпизоде.

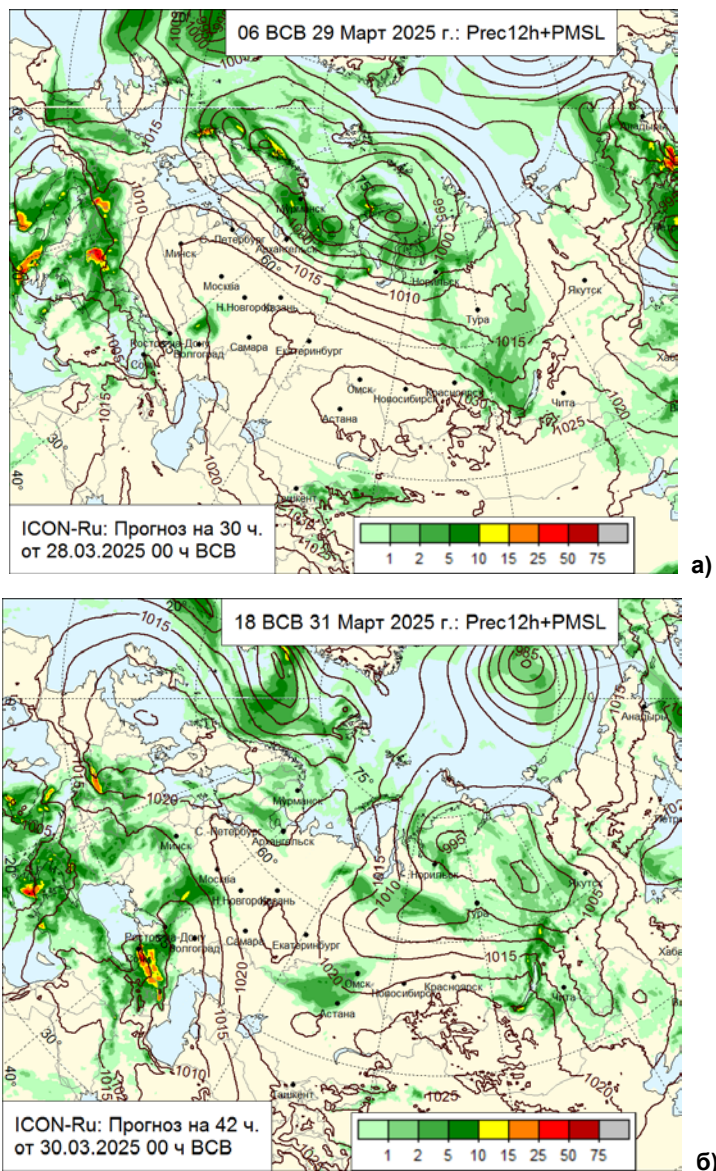


Рис. 3. Карты прогноза осадков и приземного давления ICON-Ru: 06 ч VCB 29 марта (а); 18 ч VCB 31 марта 2025 г. (б).

Fig. 3. Precipitation and surface pressure forecasts by ICON-Ru at a) 06 UTC March 29 (a); 18 UTC March 31, 2025 (б).

Качество прогнозов профилей температуры и ветра в АПС по обеим моделям COSMO-Ru и ICON-Ru в эпизоде НМУ оценивалось по данным измерений на Останкинской телебашне (ОТБ) и радиозонда в Долгопрудном в сроки 00 и 12 ч ВСВ. При анализе принималось во внимание, что модельные данные брались из узла модельной сетки в районе ВВЦ, а данные радиозонда – для удаленного Долгопрудного, поэтому сравнивать эти величины можно только на качественном уровне.

В целом, при сравнении модельных прогнозов и измерений в 4-суточном эпизоде оказалось, что температура воздуха конфигурациями систем COSMO-Ru и ICON-Ru была воспроизведена с большой точностью и, что очень важно для прогноза НМУ, модельные вертикальные градиенты температуры были близкими к реальным. Вместе с тем надо обратить внимание на некоторые детали сопоставлений модельных прогнозов и наблюдений, нашедшие отражение на рис 4.

Как видно (рис. 4а), в 00 ч 28 марта обе модели занижают температуру примерно на 1.5–2 °С. Возможно, это связано с недоучетом городского «острова тепла». По данным радиозондирования (РЗ) в Долгопрудном температура была ниже, чем по измерениям на ОТБ, кроме того, наблюдалась приподнятая инверсия на высоте около 250 м. По ICON-Ru в 00 ч значения температуры ближе к измеренным на ОТБ. По данным COSMO-Ru и ICON-Ru стратификация была более устойчивая, чем по радиозонду, но менее устойчивая, чем по ОТБ. Нужно отметить, что в 12 ч градиенты температуры по всем четырем видам данных практически совпадают. В отличие от нулевого срока, в 12 ч (рис. 4б) значения температуры ближе к измеренным на ОТБ по COSMO-Ru.

29 марта (рис. 4в) по данным ОТБ стратификация была устойчивая, инверсия наблюдалась на высоте 128 м. По данным обеих моделей и радиозонда высота инверсии составляла 200–300 м. COSMO-Ru дает значительно менее неустойчивую стратификацию (меньше вертикальный градиент) и почти на 2 °С завышает приземную температуру, значения ICON-Ru ближе к измеренным на ОТБ и станции ВВЦ. К 12 ч 29 марта (рис. 4г) воздух прогрелся до 12 °С, этот прогрев был хорошо воспроизведен ICON-Ru. Градиент температуры по данным ОТБ составлял 2.7 °С на 200 м, по модели ICON – 3 °С на 200 м, а по COSMO-Ru – 2 °С на 200 м. По данным радиозонда в Долгопрудном в этот срок было значительно теплее, чем в Москве.

Ночью 30 марта (рис. 4д) разница между температурой по данным ОТБ и моделями вновь достигла 2 °С, но при этом на станции ВВЦ в это время температура была на 0.5 °С выше температуры, прогнозируемой ICON-Ru. Вертикальный градиент температуры по ICON-Ru соответствует градиенту по данным ОТБ. К 12 ч 30 марта (рис. 4е) при интенсивном прогреве воздуха вертикальный градиент температуры со данным ОТБ и по обеим моделям составляет примерно 1–1,2 °С/100 м в нижнем 200-метровом слое, что близко к сухадиабатическому градиенту, и соответственно, приводит к усилению термического перемешивания. Важно отметить, что этот процесс был хорошо воспроизведен обеими моделями.

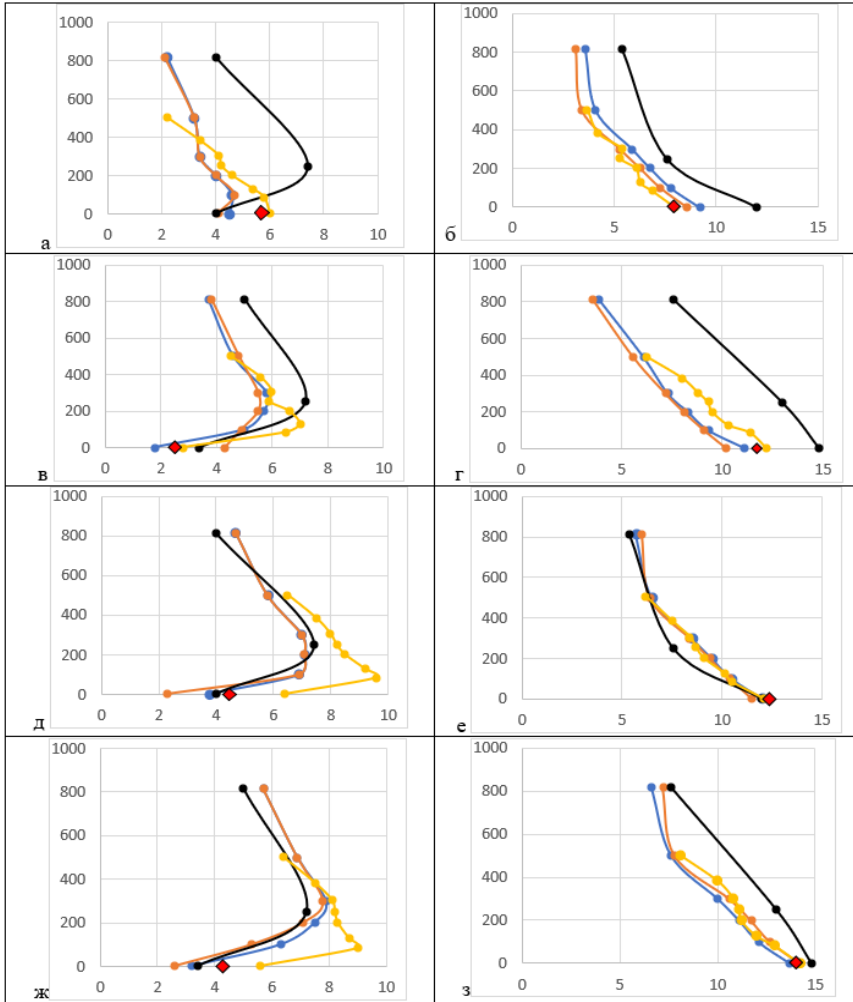


Рис. 4. Вертикальные профили температуры воздуха по прогнозам конфигураций ICON-Ru13/6N29 (синий) и COSMO-Ru6ENA (оранжевый), по наблюдениям на ОТБ (желтый), при радиозондировании в Долгопрудном (черный); красный ромб – температура на 2 м на метеостанции ВВЦ 28–31 марта 2025 г. (0 ч ВСВ – левый столбец, 12 ч ВСВ – правый столбец): 28.03 (а, б); 29.03 (в, г); 30.03 (д, е); 31.03 (ж, з).

Fig. 4. Vertical profiles of air temperature according to forecasts of configurations ICON-Ru13/6N29 (blue) and COSMO-Ru6ENA (orange), according to observations at the Ostankino TV Tower (yellow), during radiosonde sounding in Dolgoprudny (black); red diamond - temperature at 2 m at the VVC weather station. March 28 – 31, 2025 (left column – 0 UTC, right column - 12 UTC). 28.03 (а, б); 29.03(в, г); 30.03 (д, е); 31.03 (ж, з).

Ночью 31 марта (рис. 4ж) по данным ОТБ формируется сильная приземная инверсия с верхней границей на высоте 85 м, по модельным данным высота инверсии составляет 300 м. Как и в предыдущие сутки, по данным

ОТБ температура отличается в большую сторону по сравнению с данными ВВЦ. Обе системы в ночной срок занижают температуру, однако по ICON-Ru это занижение меньше. В 12 ч 30 и 31 марта обе модели прогнозируют практически полностью идентичные данным ОТБ значения температуры и ее вертикальных градиентов (рис. 4з).

Таким образом, в сроки 00 и 12 ч в рассматриваемом эпизоде обе модели удовлетворительно воспроизводили вертикальный градиент температуры. Для срока 12 ч выявлено очень хорошее согласие модельных данных и измеренных в приземном слое на ОТБ; в ночные часы прогностические значения приземной температуры были на 1.5–2 °С градуса ниже, чем измеренные на ОТБ, что, не исключено, содержит эффект влияния тела башни.

Были проведены сравнения прогнозов и измерений температуры в АПС и в другие сроки: 3, 6, 9, 15, 18 и 21 ч. Особое внимание уделено случаям, в которых модельные прогнозы заметно отличаются от данных измерений на ОТБ. Наиболее «проблемными» оказались прогнозы в сроки, близкие к восходу солнца и закату, – 6 и 18 ч ВСВ, проиллюстрированные на рис. 5. В конце марта по измерениям на ОТБ в 6 ч ВСВ еще сохраняется приземная инверсия (рис. 5а, в, д, ж), а по моделям уже начинается прогрев воздуха: повышается приземная температура, в результате чего в приземном слое формируется вертикальный профиль температуры, соответствующий сухой адиабате. Вечером в 18 ч ВСВ (рис. 5б, в, г, д) по модельным расчетам раньше, чем по наблюдениям, формируется приземная инверсия, и, возможно, модельное опережение перехода к термической устойчивости является отражением недоучета вклада сугубо городского тепла, удерживающего стратификацию температуры в состоянии от неустойчивой до нейтральной.

При анализе стратификации температуры в контексте ее влияния на рассеивание примесей важно рассмотреть воспроизведение моделью именно характеристик температурных инверсий, удерживающих примеси в приземном слое атмосферы. Примером модельных возможностей служат построенные для ночного срока в эпизоде НМУ прогностические поля НГИ – нижней границы температурной инверсии (рис. 6а) и $\Delta T_{\text{инв}}$ – интенсивности инверсионного слоя, определяемой как разность температуры на нижней и верхней границах инверсии (рис. 6б)

На рис. 6 представлены расчеты региональной конфигурации системы ICON-Ru для Центрального федерального округа с шагом сетки по горизонтали 6 км; на картах маркерами нанесены те же характеристики в пунктах аэрологического зондирования.

Можно отметить успешное воспроизведение моделью областей инверсий с различающейся нижней границей, согласующееся с данными аэрологического зондирования, а также воспроизведение неоднородности поля интенсивности инверсий с идентификацией областей слабой термической устойчивости, где $\Delta T_{\text{инв}}$ близка к нулю. Планируется провести количественные оценки воспроизведения слоев инверсий в модели.

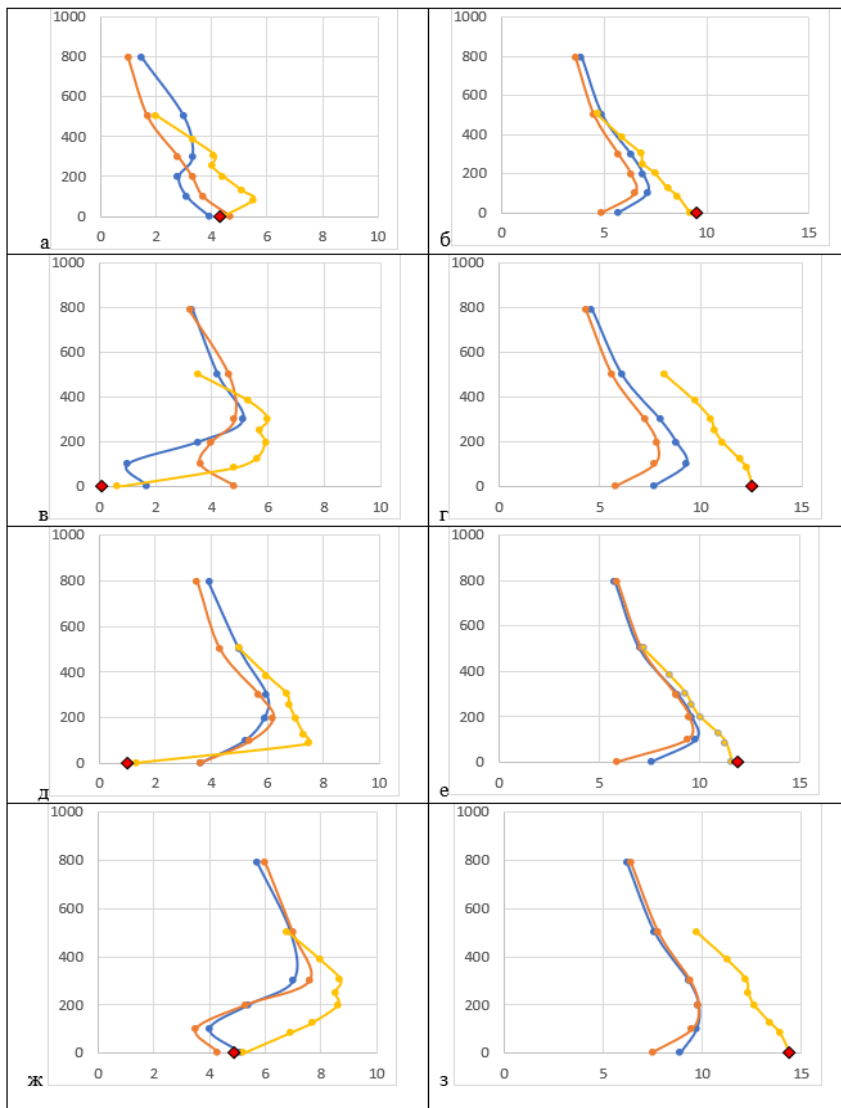


Рис. 5. Вертикальные профили температуры воздуха по данным ОТБ (желтый), ICON-Ru13/6N29 (синий) и COSMO-Ru6ENA (оранжевый); красный ромб – температура на 2 м на метеостанции ВВЦ 30–31 марта 2025 г. (6 ч ВСВ – левый столбец, 18 ч ВСВ – правый столбец): 28.03 (а, б); 29.03 (в, г); 30.03 (д, е); 31.03 (ж, з).

Fig. 5. Vertical profiles of air temperature according to data from the Ostankino TV Tower (yellow), ICON-Ru13/6N29 (blue), COSMO-Ru6ENA (orange), and temperature at 2 meters at the VVC station - red diamond during the period March 30–31, 2025, at times 6 h and 18 h. 28.03 (а, б); 29.03 (в, г); 30.03 (д, е); 31.03 (ж, з).

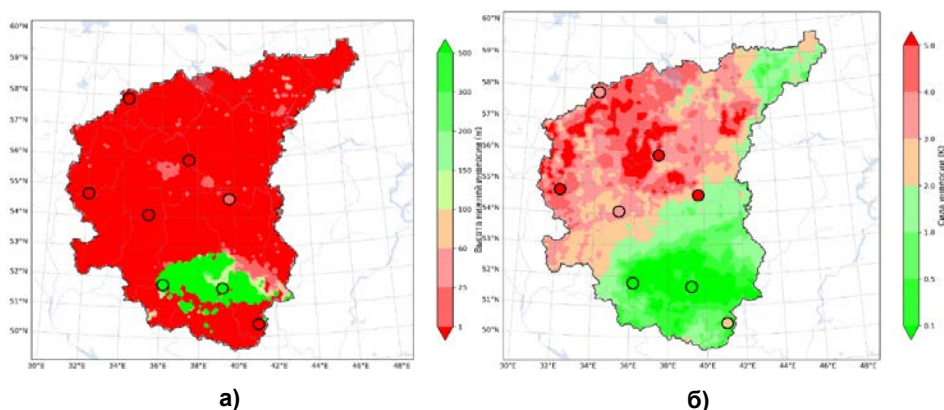


Рис. 6. Прогноз и измерения высоты нижней границы температурной инверсии, м (а) и интенсивности инверсии, К (б) конфигурации ICON-Ru на 00 ч ВСВ 29.03.2025.

Fig. 6. Forecast and measurements of the height of the lower boundary of the temperature inversion, m (a) and inversion intensity, K (б) for the ICON-Ru configuration at 00 UTC March 29, 2025.

Установленные особенности модельных расчетов температурной стратификации имеют практическую значимость для их интерпретации и пост-процессинга при прогнозировании НМУ.

2.3. Связь прогностического МПРЗ с концентрациями CO, NO и NO₂ в эпизоде НМУ 28–31 марта 2025 года

Изучению связей метеорологических условий с загрязнением воздуха посвящено много зарубежных и отечественных публикаций, список работ продолжает активно пополняться результатами региональных исследований. Во многих работах описываются связи загрязнений с отдельными или несколькими метеорологическими характеристиками – скоростью ветра, давлением, относительной влажностью, осадками, высотой геопотенциала и т. п. [1, 10, 12–14]. Реже, чем с наземными характеристиками, изучаются связи загрязнения с вертикальными метеорологическими параметрами. В частности, в [2], подтверждая результаты других авторов, отмечается значимое влияние температурной стратификации в пограничном слое, что созвучно нашим исследованиям.

Остается актуальной типизация крупномасштабной циркуляции как фактора загрязнения, в частности, установление определенного типа погоды в эпизодах сильного загрязнения [9, 12]. Разработанный в Гидрометцентре России показатель МПРЗ основан на учете воздействия конвективного перемешивания, турбулентного переноса при сдвигах ветра в АПС, удаления примеси осадками и предназначен для оценки предпосылок повышения уровня загрязнения приземного воздуха [2, 6]. МПРЗ разделяет полный диапазон атмосферных условий на три типа рассеивания: слабое –

1 тип, умеренное – 2 тип и интенсивное – 3 тип (соответственно, МПРЗ-1, МПРЗ-2, МПРЗ-3) [6]. Для верификации МПРЗ ранее нами были использованы данные о загрязнении приземного воздуха по измерениям на АСКЗА Мосэкомониторинг [3]; ниже обсуждаются результаты сравнений МПРЗ с измерениями концентраций на Останкинской телебашне на уровнях 0, 248 и 348 м (сайт) в эпизоде 28–31 марта 2025 года.

Как видно на рис. 7, где индикатором загрязнения является диоксид азота (NO_2), загрязнение с высотой в основном уменьшается: концентрация NO_2 на высоте 248 м примерно в 1.5 раза меньше, на высоте 348 м в 2–2.5 раза меньше, чем на нижнем уровне. При этом в ночные часы при МПРЗ-1 и МПРЗ-2 временами наблюдается специфическое нелинейное изменение с высотой концентрации NO_2 : при стабильности наибольшего загрязнения приземного слоя сближение концентрации в слое 248–348 м, а в отдельные часы и более высокие концентрации NO_2 на верхнем уровне (348 м), что обеспечивается переносом загрязнений благодаря турбулентному перемешиванию при термической устойчивости. При МПРЗ-3 в дневные часы (29, 30 и 31 марта) при интенсивном конвективном перемешивании наблюдается уменьшение загрязнения всего нижнего 350-метрового слоя.

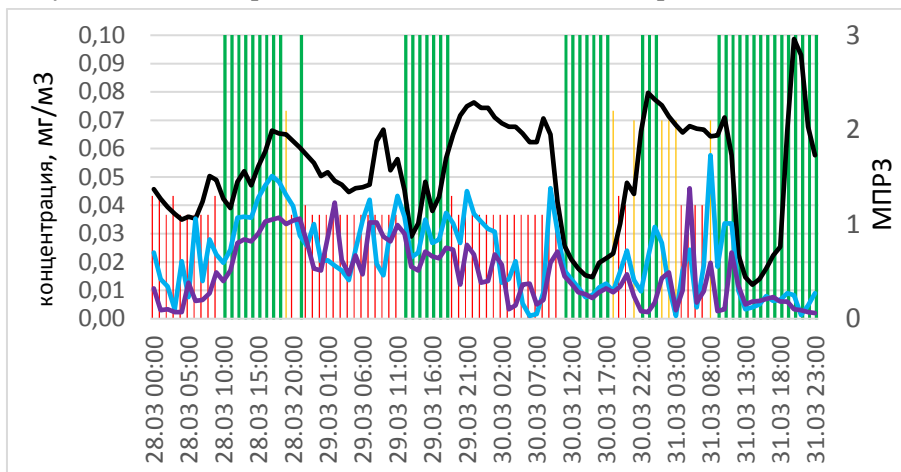


Рис. 7. Концентрация NO_2 (mg/m^3) по измерениям на ОТБ на уровне 0 м (черный), 248 м (голубой), 348 м (фиолетовый) и прогностические величины МПРЗ (столбцы гистограммы): красный МПРЗ-1, желтый МПРЗ-2, зеленый МПРЗ-3. 28–31 марта 2025 г.

Fig. 7. Concentration of NO_2 (mg/m^3) according to measurements at the Ostankino TV Tower at level 0 m (black), 248 m (light blue), 348 m (purple), and prognostic values of MIPD (histogram bars): red MIPD-1, yellow MIPD-2, green MIPD-3. March 28–31, 2025.

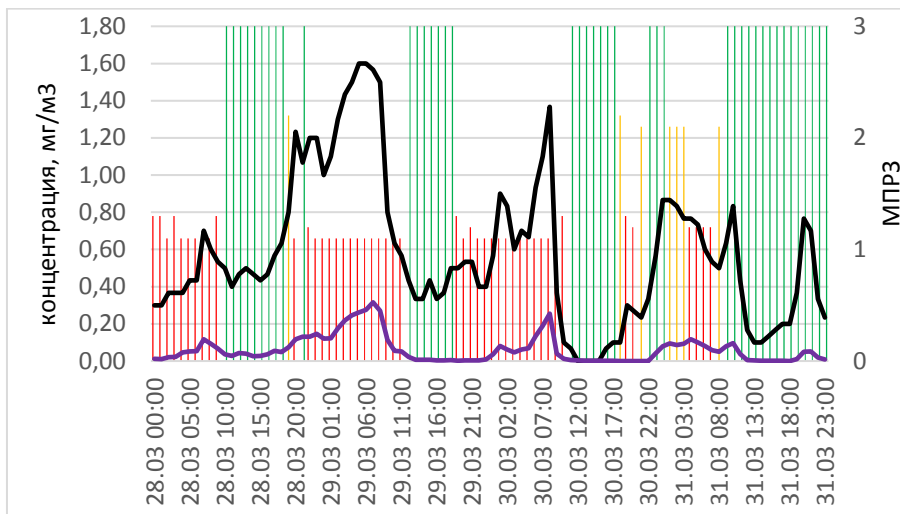
Отдельно заметим, что в эпизоде при МПРЗ-3 было два периода роста концентраций NO_2 . Первый (28.03) связан с редким явлением – возвратом прошедшей над Москвой воздушной массой. Ночью и рано утром прошли дожди, днем 28.03 северо-западный перенос сменился на юго-восточный,

в уже насыщенном городскими примесями воздухе и после обычного утреннего пика загрязнение продолжало увеличиваться. Аномальный рост был зафиксирован на многих АСКЗА, в частности на АСКЗА Лосиный остров, где концентрация к вечеру превысила обычный фон в 2 раза (рис. 9а). Второй период роста концентраций NO_2 при МПРЗ-3 имел место вечером 31.03 при умеренном юго-восточном переносе в отсутствие инверсии (рис. 5з). Этот случай повсеместного кратковременного всплеска загрязнения (с 18 до 21 ч), возможно, связан со специфическими процессами мезомасштабного переноса вторичных загрязнений и нуждается в детальном анализе. При этом следует принять во внимание, что оба аномальных «периода» роста NO_2 совпали с вечерним пиком трафика в пятницу и в понедельник, высокая вариабельность нагрузки в которых может существенно повлиять на рост концентраций.

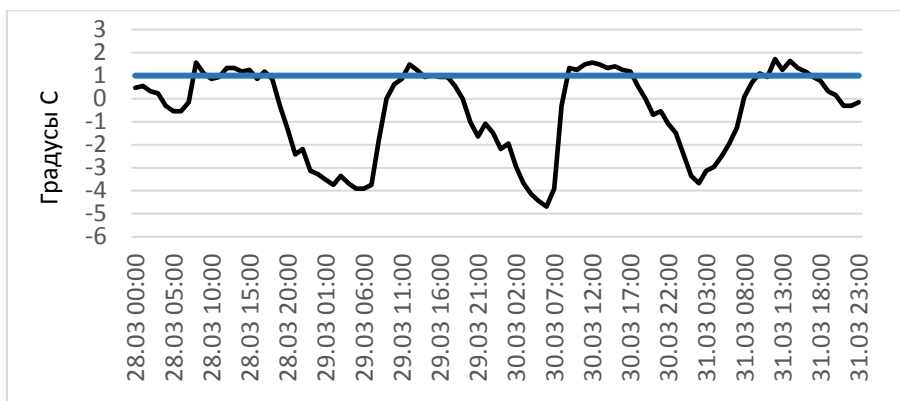
Представленный на рис. 8а временной ход концентрации оксидов азота и углерода (NO , CO) по измерениям на нижнем уровне ОТБ подтверждает описанные выше основные закономерности: наибольшие концентрации NO и CO наблюдаются при МПРЗ-1 и МПРЗ-2, а пиковых значений уровни загрязнения достигают в часы вечернего и утреннего максимума транспортной нагрузки (рис. 8а), что совпадает с приведенными в [7] данными.

Следует отметить, что при МПРЗ-1 и МПРЗ-2 процесс обычного вечернего повышения загрязнения до максимума занимает от 3 до 5 часов. В утренние часы при появлении МПРЗ-3 происходит быстрое снижение уровня загрязнения вследствие нарастающей с восходом солнца толщины слоя конвективного перемешивания. И только указанными в разделе 2.1 особенностями модельного прогноза стратификации, а именно, задержкой утром перехода к термической неустойчивости, можно объяснить резкое падение концентраций утром при «ложном» прогнозе МПРЗ-1 и МПРЗ-2 (рис. 8а). Поскольку по данным о температуре на ОТБ уже около 9 ч инверсия в приземном слое разрушалась (рис. 8б), что, по-видимому, служило началом процессов очищения даже при градиенте температуры меньше сухоадиабатического. Следует подчеркнуть, что ночное 3–5-кратное превышение фоновых уровней NO и CO наблюдалось при сохранявшихся не менее 12 часов приземных инверсиях, при максимальном развитии которых вертикальный градиент достигал 5–6 °C/100 м. В целом в рассматриваемом эпизоде температурный градиент в приземном слое хорошо согласуется как с МПД для верификации МПРЗ, кроме наблюдений на ОТБ, использованы данные о загрязнении на близко расположенных к Останкинской телебашне трех АСКЗА (Полярная, Глебовская и Лосиный остров). Представленные на рис. 9 МПРЗ и концентрации NO_2 , NO , CO на АСКЗА при и имеющих место локальных особенностях демонстрируют в целом удовлетворительное согласие колебаний уровней загрязнения с типом МПРЗ. В частности, наблюдается достаточно выраженная синхронизация (с временным лагом 1–2 часа) роста загрязнений на всех АСКЗА при наступлении НМУ в вечерние часы, характерное общее понижение ночного уровня при слабом рассеивании, а также формирование на всех АСКЗА утреннего

максимума при МПРЗ-1, МПРЗ-2, по сравнению с вечерним менее продолжительного из-за перехода АПС в состояние термической неустойчивости РЗ, так и с концентрациями рассмотренных загрязняющих веществ.



а)

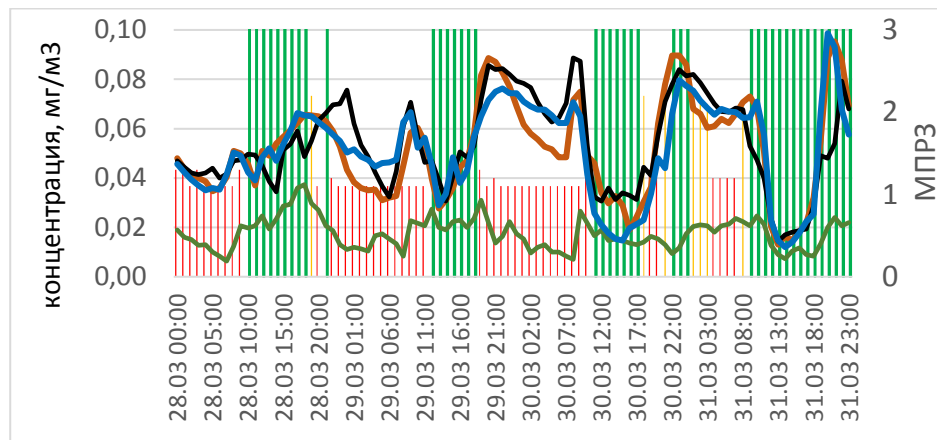


б)

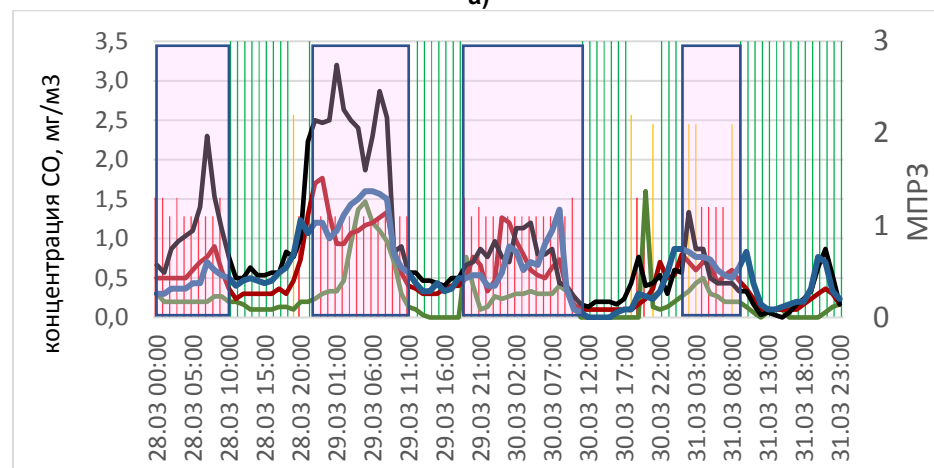
Рис. 8. Приземная концентрация NO (сиреневый), CO (черный), $\text{мг}/\text{м}^3$, по измерениям на ОТБ и прогностические величины МПРЗ (столбцы гистограммы): красный МПРЗ-1, желтый МПРЗ-2, зеленый МПРЗ-3 (а); временной ход градиента температуры в приземном слое ($^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$) по измерениям на ОТБ – черная линия, синяя линия – сухоадиабатический градиент (б). 28-31 марта 2025 г.

Fig. 8. Surface concentration of NO (purple), CO (black), $\text{мг}/\text{м}^3$, according to measurements at the Ostankino TV Tower and forecast values of MIPD (histogram bars): red MIPD-1, yellow MIPD-2, green MIPD-3 (a), time course of temperature gradient in the surface layer ($^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$) according to measurements at the Ostankino TV Tower - black line, blue line - dry adiabatic gradient (б). March 28-31, 2025.

Нельзя не отметить того, что содержание первичных загрязнений (NO , CO) достигало наибольших значений при МПРЗ-1, МПРЗ-2 уже в начале эпизода НМУ, а наиболее высокое загрязнение NO_2 наблюдалось на 2–3 сутки (рис. 9).



а)



б)

Рис. 9. Приземная концентрация NO_2 (а), CO (б), mg/m^3 , на АСКЗА Глебовская (бордовая линия), Полярная (черная линия), Лосиный остров (зеленая линия) и на ОТБ (синяя линия). Окна с розовой заливкой – прогноз МПРЗ-1 или МПРЗ-2. 28–31 марта 2025 г.

Рис. 9. Surface concentration of NO_2 (а), CO (б), mg/m^3 , according to measurements at the Glebovskaya (burgundy line), Polyarnaya (black line), Losinyy ostrov (green line) and at the Ostankino TV Tower (blue line). Windows with pink fill – prognostic values of MIPD-1 or MIPD-2. March 28–31, 2025.

Это может служить иллюстрацией того, что при длительных НМУ активизируются процессы образования вторичных загрязнений, более токсичных по сравнению с первичными выбросами, что и зафиксировано в условиях малооблачной сухой аномально теплой для конца марта погоды (в Москве температура повышалась до +14–16 °С. Заслуживает отдельного внимания тот факт, что вечером 31 марта отмеченный выше аномальный пиковый всплеск NO₂ по данным измерений первичных загрязнений NO, CO не наблюдался.

Заключение

В Гидрометцентре России ежедневно рассчитывается показатель МПРЗ, который позволяет делать выводы об условиях рассеяния примесей в течение текущих и следующих суток. Для расчета МПРЗ в последние годы использовались прогностические данные системы COSMO-Ru, а в связи с переходом на прогностические данные системы ICON-Ru выполнены предварительные оценки качества прогнозов конфигураций с шагом сетки по горизонтали 6 км (COSMO-Ru6ENA и ICON-Ru13/6N29) за 6 месяцев 2025 года. Используя пакет верификации METplus, проведены сравнения прогностических величин температуры, скорости ветра на изобарических поверхностях 1000, 925 и 850 гПа в пунктах радиозондирования на ЕТР. ICON-Ru показала преимущество над предыдущей моделью по качеству прогнозов большинства метеопараметров, можно отметить главные выводы:

- в большинстве случаев прогнозы температуры на 1000 и 925 гПа по ICON-Ru оказались более успешными, чем по COSMO-Ru;

- общей закономерностью является уменьшение MAE прогноза температуры на уровне 925 гПа по сравнению с уровнем 1000 гПа, при этом MAE растет по мере увеличения заблаговременности прогноза;

- оценки скорости ветра менее однозначные: в январе и в феврале в большинстве случаев прогнозы скорости ветра на уровне 1000 гПа оказались более успешными по COSMO-Ru, далее с каждым месяцем прогнозы по ICON-Ru улучшались, в мае и июне ошибки прогнозов ICON-Ru меньше, чем по COSMO-Ru.

Важным этапом исследований было сравнение прогнозируемых системами COSMO-Ru и ICON-Ru метеопараметров на вертикальных уровнях, для чего были привлечены данные радиозондов и наблюдений на Останкинской телебашне. Полученные результаты указывают на то, что прогнозы вертикальных профилей температуры ICON-Ru в большинстве случаев ближе к измеренным характеристикам, чем расчеты по COSMO-Ru.

Яркий эпизод НМУ 28–31 марта и повышенного загрязнения в Москве использован для верификации прогнозов МПРЗ по данным ICON-Ru с применением данных измерений концентраций загрязняющих веществ на трех высотных уровнях ОТБ и наземных измерений (CO, NO и NO₂) на близко расположенных к ОТБ станциях.

Изучены особенности временной динамики отдельных загрязнений при разных типах МПРЗ, подтверждена связь МПРЗ-1 типа (слабое рассеивание) с повышением концентраций загрязняющих веществ на станциях городского типа. В целом прогноз МПРЗ в период НМУ, рассчитанный по прогнозам параметров ICON-Ru, вполне успешно описывал воздействие крупномасштабных атмосферных процессов и локальных метеорологических условий на загрязнение приземного воздуха, что указывает на обоснованность и целесообразность оперативного использования данных модели ICON-Ru для прогноза МПРЗ.

Список литературы

1. Васильев Д.Ю., Вельмовский П.В., Семенов В.А., Семенова Г.Н., Чибилев А.А. Влияние метеорологических условий на уровень загрязнения атмосферного воздуха в городе Уфе // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36, № 1. С. 49-58. DOI: 10.15372/AOO20230107
2. Еланский Н.Ф., Шилкин А.В., Пономарев Н.А., Захарова П.В., Качко М.Д., Поляков Т.И. Пространственно-временные вариации содержания загрязняющих примесей в воздушном бассейне Москвы и их эмиссии // Известия РАН. ФАО. 2022. Т. 58, № 1. С. 92-108.
3. Кирсанов А.А., Тарасова М.А., Бундель А.Ю., Астахова Е.Д., Шувалова Ю.О., Розинкина И.А., Блинов Д.В. Многофакторная верификация результатов численных прогнозов погоды оперативной системы COSMO-Ru и отдельных компонент развиваемой COSMO-Ru/icon // Метеорология и гидрология. 2024. № 8. С. 126-141.
4. Кузнецова И.Н., Ткачева Ю.В., Борисов Д.В. Методы прогнозирования метеорологических условий, влияющих на загрязнение приземного воздуха // Метеорология и гидрология. 2024. № 8. С. 87-103. DOI: 10.52002/0130-2906-2024-8-87-103
5. Кузнецова И.Н., Ткачева Ю.В., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И. Прогнозирование метеорологического показателя рассеивания загрязняющих веществ в приземном воздухе // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 3 (381). С. 131-149.
6. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б. и др. Разработка оперативной системы численного прогноза погоды и метеоусловий опасных явлений с высокой детализацией для Московского региона // Метеорология и гидрология. 2020. № 7. С. 5-19. DOI: 10.3103/s1068373920070018
7. Розинкина И.А., Ривин Г.С., Базров А.Н., Блинов Д.В. и др. Конфигурация COSMO-Ru2By модели COSMO: успешность и методология оценки численных прогнозов и γ-мезомасштабных атмосферных процессов // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 2 (388). С. 6-34. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-2-6-34>
8. Ткачева Ю.В., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И. Усовершенствованная технология прогноза метеорологических параметров и условий, влияющих на загрязнение воздуха // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 3 (385). С. 161-177.
9. Brown B., Jensen T., Gotway J.H. et al. The Model Evaluation Tools (MET): More than a Decade of Community-Supported Forecast Verification // Bulletin of the American Meteorological Society. 2021. Vol. 102, no. 4. P. E782-E807. DOI: 10.1175/BAMS-D-19-0093.1
10. Ziyue Chen Danlu, Chuanfeng Meipo et al. Influence of meteorological conditions on PM_{2.5} concentrations across China: A review of methodology and mechanism // Environ Int. 2020. Vol. 109. P. 105558. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105558
11. Pérez I.A., García M.Á., Sánchez M.L., Pardo N. et al. Points in Air Pollution Meteorology // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2020. Vol. 17. P. 8349. <https://doi.org/10.3390/ijerph17228349>.
12. Nakyai T., Santasnachok M., Thetkathuek A., Phatrabuddha N. Influence of meteorological factors on air pollution and health risks: A comparative analysis of industrial and urban areas in Chonburi Province, Thailand // Environmental Advances. 2025. Vol. 19. P. 100608.
13. Vasil'ev D.Y., Yelizariyev A.N., Kucherova D.S. et al. An analysis of meteorological conditions and concentrations of atmospheric impurities in the city of Ufa // Russ. Phys. J. 2025. Vol. 68. P. 1005-1009. <https://doi.org/10.1007/s11182-025-03528-7>

14. Zhang T., Zhang R., Zhong J., Shen X. *al.* Classification and estimation of unfavourable boundary-layer meteorological conditions in Beijing for pm_{2.5} concentration changes using vertical meteorological profiles// *Atm. Res.* 2023. 15 September 2023.

References

1. Vasilev D.Yu., Velmovsky P.V., Semenov V.A., Semenova G.N., Chibilev A.A. The influence of meteorological conditions on the level of atmospheric air pollution in Ufa. *Atmospheric and Oceanic Optics.* 2023, vol. 36, no. 3, pp. 234-243. DOI: 10.1134/S1024856023030211

2. Elansky N.F., Shilkin A.V., Ponomarev N.A., Zakharova P.V., Kachko M.D., Poliakov T.I. Spatiotemporal variations in the content of pollutants in the Moscow air basin and their emissions. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2022, vol. 58, no. 1, pp. 92-108. DOI: 10.1134/S0001433822010029

3. Kirsanov A.A., Tarasova M.A., Bundel' A.Yu., Astakhova E.D., Shuvalova Yu.O., Rozinkina I.A., Blinov D.V. Multipurpose verification of the COSMO-Ru operational system and experimental technologies based on the ICON model. *Russian Meteorology and Hydrology.* 2024, vol. 49, no. 8, pp. 750-761. DOI: 10.3103/S1068373924080041.

4. Kuznetsova I.N., Tkacheva Yu.V., Borisov D.V. Methods for Forecasting Meteorological Conditions Affecting Surface Air Pollution. *Russian Meteorology and Hydrology.* 2024, vol. 49, no. 8, pp. 722-734. DOI: 3103/S1068373924080077

5. Kuznetsova I.N., Tkacheva Yu.V., Shalygina I.Yu., Nakhaev M.I. Forecasting a meteorological indicator of pollutant dispersion in surface air. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*. 2021, vol. 381, no. 3, pp. 131-149 [in Russ.].

6. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Vil'fand R.M., Kiktev D.B. *et al.* Development of the High-resolution Operational System for Numerical Prediction of Weather and Severe Weather Events for the Moscow Region. *Russian Meteorology and Hydrology.* 2020, vol. 45, no. 7, pp. 455-465.

7. Rozinkina I. A., Rivin G. S., Bagrov A.N., Blinov D.V. *et al.* The COSMO-Ru2By configuration of the COSMO model: skill and methodology for estimating of the forecasts of β - and γ -mesoscale processes *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*. 2023, vol. 388, no. 2, pp. 6-34 [in Russ.].

8. Tkacheva Yu.V., Kuznetsova I.N., Nakhaev M.I. Improved technology for forecasting meteorological parameters and conditions affecting air pollution. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*. 2022, vol. 385, no. 3, pp. 161-177 [in Russ.].

9. Brown B., Jensen T., Gotway J.H. *et al.* The Model Evaluation Tools (MET): More than a Decade of Community-Supported Forecast Verification. *Bulletin of the American Meteorological Society.* 2021, vol. 102, no. 4, pp. E782-E807. DOI: 10.1175/BAMS-D-19-0093.1

10. Ziyue Chen Danlu, Chuanfeng Meipo *et al.* Influence of meteorological conditions on PM_{2.5} concentrations across China: A review of methodology and mechanism. *Environ Int.* 2020, vol. 109, pp. 105558. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105558

11. Pérez I.A., García M.Á., Sánchez M.L., Pardo N. *et al.* Points in Air Pollution Meteorology. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2020, vol. 17, pp. 8349. <https://doi.org/10.3390/ijerph17228349>

12. Nakyai T., Santasnachok M., Thetkathuek A., Phatrabuddha N. Influence of meteorological factors on air pollution and health risks: A comparative analysis of industrial and urban areas in Chonburi Province, Thailand. *Environmental Advances.* 2025, vol. 19, pp. 100608.

13. Vasil'ev D.Y., Yelizariyev A.N., Kucherova D.S. *et al.* An analysis of meteorological conditions and concentrations of atmospheric impurities in the city of Ufa. *Russ. Phys. J.* 2025, vol. 68, pp. 1005-1009. <https://doi.org/10.1007/s11182-025-03528-7>

14. Zhang T., Zhang R., Zhong J., Shen X. *al.* Classification and estimation of unfavourable boundary-layer meteorological conditions in Beijing for pm_{2.5} concentration changes using vertical meteorological profiles. *Atm. Res.* 2023, 15 September 2023.