

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-3-161-177>

УДК 504.3.054+504.06+505.75

Усовершенствованная технология прогноза метеорологических параметров и условий, влияющих на загрязнение воздуха

Ю.В. Ткачева, И.Н. Кузнецова, М.И. Нахаев

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
tuza@mecom.ru*

Описана усовершенствованная технология расчета прогноза метеорологического показателя рассеивания загрязнения (МППЗ). Показаны изменения алгоритма расчета МППЗ, принятые по результатам верификации прогнозов МППЗ с использованием данных о концентрациях загрязняющих веществ. С учетом полученных при оценке качества модельных прогнозов скорости ветра и температуры в атмосферном пограничном слое разработаны и представлены способы их коррекции на этапе препроцессинга, оптимизирована процедура пространственного осреднения входящих в расчет МППЗ параметров. Выполненное усовершенствование технологии позволило уменьшить число ложных прогнозов МППЗ в диапазоне метеорологических условий, способствующих накоплению загрязнений в приземном воздухе.

Ключевые слова: метеорологический показатель рассеивания загрязнения, метеорологические условия загрязнения воздуха, неблагоприятные метеорологические условия, гидродинамический прогноз, горизонтальное разрешение модели, верификация прогностических данных

Improved technology for forecasting meteorological parameters and conditions affecting air pollution

Yu.V. Tkacheva, I.N. Kuznetsova, M.I. Nakhaev

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia
tuza@mecom.ru*

An improved technology for calculating the forecast of the meteorological indicator of pollution dispersion (MIPD) is described. The changes in the MIPD calculation algorithm adopted from the results of verification of the algorithm using data on the concentrations of pollutants are shown. Taking into account the model forecasts of wind speed and temperature in the atmospheric boundary layer obtained in the process of the quality assessment, methods for their correction at the preprocessing stage have been developed and presented. The procedure for spatial averaging of the parameters included in the MIPD calculation has been optimized. The improvement in the technology has reduced the number of false MIPD forecasts in the range of meteorological conditions that contribute to the accumulation of pollution in surface air.

Keywords: meteorological indicator of pollution dispersion, meteorological conditions of air pollution, adverse weather conditions, hydrodynamic forecast, model horizontal resolution, forecast data verification

Введение

В соответствии с ведомственными нормативными документами [6], в сетевых подразделениях Росгидромета оперативно проводится прогнозирование метеорологических условий и загрязнения воздуха в зоне ответственности УГМС, включая НМУ (неблагоприятные метеорологические условия) [5]. Для централизованного метеорологического обеспечения сетевых подразделений детализированными по времени и пространству данными численной модели атмосферы в Гидрометцентре России разработана и реализована технология оперативных расчетов метеорологических параметров, влияющих на загрязнение воздуха [4], на основе данных конфигурации модели COSMO-Ru7ETR [7].

Технология, подробно описанная в [4], включает в себя три информационных блока: «Профили» – прогноз на текущие и следующие сутки вертикальных профилей температуры, направления и скорости ветра у земли и на высотах 100, 200, 300 и 500 м, а также на изобарической поверхности 925 гПа; «Почасовой прогноз МПРЗ» – анимационный файл прогностического метеорологического показателя рассеивания (МПРЗ); «Внутрипериодный прогноз МПРЗ» – осредненный прогноз МПРЗ для 6-часовых характерных внутрисуточных интервалов.

В последние годы в Гидрометцентре России разработаны и реализованы новые конфигурации модели COSMO (COSMO-Ru6ENA, COSMO-Ru2ETR, COSMO-Ru2CFO, COSMO-Ru1MSK) [7, 8]. В конфигурациях с высоким разрешением (2,2 км и меньше) некоторые физические процессы (конвективные и др.) включены уже не параметризацией процессов подсеточного масштаба, а непосредственно описаны системой гидродинамических уравнений. Увеличение пространственного разрешения гидродинамических моделей повышает точность метеорологических прогнозов, их детализацию в пространстве, а также способствует развитию и усовершенствованию других специализированных прогнозов, в частности прогнозов МПРЗ, зависящих от точности прогнозируемых моделями осадков, температуры и ветра в атмосферном пограничном слое (АПС). Постоянное усовершенствование и ввод новых конфигураций численных моделей для пользователей означает необходимость перманентного мониторинга качества прогнозов используемых метеорологических характеристик. Проведенные совместно с сетевыми специалистами независимые испытания метода расчета прогноза МПРЗ на базе реализованной нами технологии позволили установить систематические погрешности модельных прогнозов метеорологических характеристик в АПС, ставшие основой для введения коррекции как отдельных метеорологических характеристик, так и показателя рассеивания (МПРЗ).

В данной работе описывается усовершенствованный алгоритм расчета МПРЗ, наиболее существенные изменения в технологии прогноза, а также проведенная верификация алгоритма расчета МПРЗ с применением данных наблюдений метеорологических характеристик на телебашне

Останкино в слое до 305 м и данных измерений концентраций загрязняющих веществ на станциях автоматизированного контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) в Москве (<https://mosecom.mos.ru/vozdux/>).

Верификация алгоритма расчета МПРЗ по данным загрязнения приземного воздуха

Апробация прогнозов МПРЗ в режиме оперативного контроля позволили выявить ситуации расхождения оценки метеорологических условий, оцениваемых с применением МПРЗ, с наблюдавшимися колебаниями уровня загрязнения. Для верификации и обоснованности первичного алгоритма расчета МПРЗ, описанного [4], впервые были привлечены данные температуры и ветра в нижнем 300-метровом слое атмосферы по наблюдениям на телебашне Останкино и данные измерений концентрации загрязняющих веществ (NO_2 и CO) на 40 АСКЗА в Москве. На основе этих уникальных данных для анализа подготовлена экспериментальная база почасовых данных в 2021 году, включающая диагностические расчеты МПРЗ. Особое внимание при анализе уделено ситуациям с повышением загрязнения приземного воздуха, т.н. «эпизодам загрязнения» [5]. В качестве маркера загрязнения принята осредненная по данным всех городских станций концентрация NO_2 и CO ; в качестве критерия «эпизода загрязнения» принято двух и более кратное превышение фоновых концентраций NO_2 и CO . В выбранный для верификации 2021 год было идентифицировано 24 эпизода, соответствующих таким условиям. Оказалось, что наибольшее число эпизодов загрязнения (четыре) наблюдалось в июле: по три эпизода в феврале, апреле и августе, по два в марте, мае, июне, по одному эпизоду в январе, октябре и ноябре. Один из выделенных эпизодов загрязнения был связан с сильным продолжительным туманом в Москве в первые числа ноября. Каждый «эпизод загрязнения» сопоставлялся с диагностическим МПРЗ.

Метеорологический показатель рассеивания загрязнения в градации значений 1.1–1.3 (МПРЗ 1 типа) отражает атмосферные процессы, способствующие накоплению загрязняющих веществ в приземном воздухе; МПРЗ этого типа в один внутрисуточный период (ночь, утро, день или вечер) представляет кратковременные метеоусловия для накопления, а последовательное сохранение периодных МПРЗ 1 типа формирует возрастающий по опасности период НМУ [4]. В диапазон значений МПРЗ 2.1–2.3 (МПРЗ 2 типа) включены процессы умеренного рассеивания. Значения МПРЗ 3.1–3.3 (МПРЗ 3 типа) указывают на интенсивное перемешивание или вымывание осадками.

На рис. 1 представлены несколько характерных «эпизодов загрязнения» из 24 имевших место в 2021 году. Как видно, зимнему эпизоду загрязнения 18–19 января с превышением фоновых концентраций в 2–3 раза предшествовали условия интенсивного рассеивания с $\text{МПРЗ} > 3$ (рис. 1а).

Вечером 17 января (воскресенье) и ночью 18 января по МПРЗ условия способствовали накоплению загрязнения, но повышения его уровня не произошло, что можно объяснить малой загруженностью автодорог воскресным вечером при 20-градусных морозах. Первые два дня рабочей недели наблюдался повышенный уровень загрязнения с пиковыми концентрациями в дневные часы; ему в условиях застойной синоптической ситуации соответствовал МПРЗ 1 типа. Переход к интенсивному рассеиванию (МПРЗ = 3.3) днем 20 января привело к окончанию почти 2-суточного эпизода загрязнения.

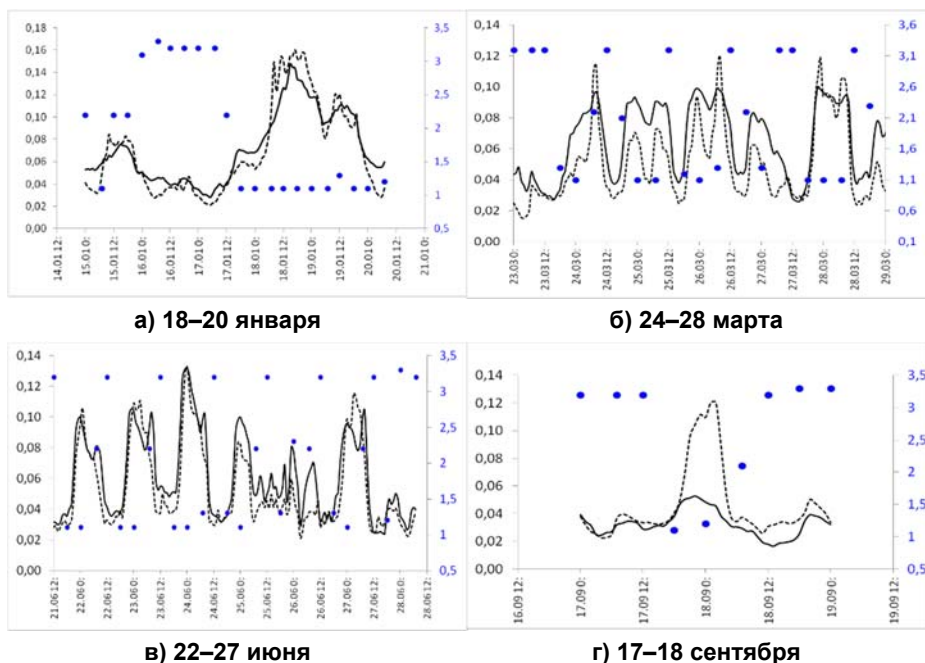


Рис. 1. Осредненная по станциям автоматизированного мониторинга концентрация NO_2 и деленная на 10 концентрация CO , $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$, (черная сплошная и штриховая линия соответственно, левая шкала), МПРЗ (синие маркеры, правая шкала).

Fig. 1. Averaged by automated monitoring stations, the concentration of NO_2 and the concentration of CO divided by 10 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, (black solid and dashed line, respectively, left scale), MIPD (blue markers, right scale).

МПРЗ в полной мере отражает сезонные особенности суточного цикла метеорологических характеристик, влияющих на рассеивание примеси. Весной важнейшим механизмом очищения воздуха от загрязнений становится дневная термическая неустойчивость атмосферного пограничного слоя, в послеполуденные часы обеспечивающая минимум загрязнения и препятствующая образованию длительных эпизодов загрязнения даже при слабом ветре. На рис. 1б показана внутрисуточная динамика МПРЗ и загрязнения приземного воздуха в мартовском эпизоде загрязнения

(24–28 марта), в котором повышенный уровень загрязнения при МПРЗ 1 типа большую часть суток прерывался появлением МПРЗ 3 типа с соответствующим понижением загрязнения до фоновых уровней. Подчеркнем, что при сохранении МПРЗ 1 типа три срока подряд (с вечера до утра 25–26 и 27–28 марта) загрязнение было больше по сравнению с короткопериодными МПРЗ 1 типа (вечер – ночь 23–24 марта, ночь – утро 25 марта). Можно заметить, что в этом мартовском эпизоде загрязнения проявился «эффект выходного дня»: наибольшее по продолжительности и уровню загрязнение приземного воздуха (NO_2 и CO) наблюдалось вечером в субботу (27 марта) и в первую половину воскресного дня.

Продолжительный эпизод загрязнения в 20-х числах июня 2021 года представлен на рис. 1в. Двухнедельная волна тепла сопровождалась мощными радиационными инверсиями, слабым переносом в нижних слоях атмосферы. Условия для накопления загрязнения формировались в вечерние часы и ночью, что отражают величины МПРЗ 1 типа. Только в одном эпизоде 23–24 июня МПРЗ 1 типа сохранялся и в утренние часы, что напрямую связано с максимальным в эпизоде уровнем загрязнения NO_2 и CO . Как видно, внутри эпизода (25–26 июня) наблюдалось резкое понижение уровня загрязнения с характерными короткопериодными колебаниями при выпадении осадков. Резкий рост загрязнения вечером в субботу 26 июня сохранялся до утра воскресенья 27 июня, в дневные часы при МПРЗ 3 типа уровень загрязнения понизился до фоновых значений. Можно отметить, что пиковые значения загрязнения в июньском эпизоде сравнимы с максимальными величинами в весенних эпизодах, но оказались меньше, чем в длительном эпизоде загрязнения в январе. Этому могли способствовать не только меньшая продолжительность радиационных инверсий [3], но и уменьшение загруженности автодорог в начале сезона отпусков, что отмечалось в [2].

Следует подчеркнуть, что «эффект выходного дня» проявился почти в половине рассмотренных эпизодов. Это позволяет сделать вывод, что особый режим транспортных потоков в мегаполисе в выходные дни в теплый сезон является дополнительным фактором ухудшения качества воздуха при ослабленных условиях рассеивания загрязнения и он практически не проявляется в условиях интенсивного рассеивания (МПРЗ 3 типа). Отраженный на рис. 1г эпизод загрязнения в сентябре может служить еще одной иллюстрацией «эффекта выходного дня». Показано, что вечером в пятницу 17 сентября (на фоне сезонно обусловленного раннего перехода АПС в устойчивое состояние) происходило повышение уровня CO . Несколько часов при МПРЗ 1 типа оказалось достаточным для трехкратного превышения фона CO и его сохранения в ночь на субботу; умеренное рассеивание (подтип МПРЗ = 2,2) субботним утром обеспечило резкое понижение уровня загрязнения. Здесь можно отметить, что при высокой синхронизации колебаний уровней выбранных маркеров (NO_2 и CO) в осенних эпизодах загрязнения концентрация CO оказалась

более чувствительной к изменению метеорологических условий. При интерпретации результатов нельзя не принимать во внимание, что оксид углерода (CO) по сравнению с окислами азота (NO₂) – химически менее активная примесь, в Москве для него по оценкам за период 2005–2020 гг. [2] характерен бимодальный годовой ход с почти равными максимумами в феврале и августе–сентябре и примерно на 10 % меньше минимумом в июне–июле. А сезонный цикл NO₂ в Москве – одномодальный с выраженным максимумом в феврале–апреле и уменьшением уровня в летние и осенние месяцы почти на 20 %.

Анализ всех 24 эпизодов загрязнения и сопоставление их с МПРЗ позволил внести некоторые коррективы в алгоритм расчета МПРЗ.

Усовершенствование алгоритма расчета МПРЗ

По результатам верификации диагностического МПРЗ с применением в качестве маркера загрязнения осредненных по станциям «Мосэкомониторинг» концентраций малореактивных загрязняющих веществ (NO₂ и CO), не меняя принципиально метод определения МПРЗ, проведено усовершенствование алгоритма в части количественного уточнения градаций скорости ветра и параметра стратификации, а также осадков.

На рис. 2 представлена уточненная схема почасового расчета МПРЗ; для диагностирования МПРЗ используются данные наблюдений входящих параметров, для прогноза – модельные прогностические данные. Часовые прогностические величины МПРЗ являются основой для блока технологии «анимационный прогноз». Для практического использования рекомендуется применять рассчитанный для 6-часовых внутрисуточных периодов МПРЗⁿ (рис. 3).

Принимая во внимание результаты верификации метода расчета МПРЗ, а также учитывая значительную короткопериодную изменчивость метеохарактеристик в АПС и сезонную зависимость типового времени перехода от термической неустойчивости к устойчивости, при определении МПРЗⁿ проводятся сезонные смещения временных интервалов осреднения для установления характерного значения ($F^n = \{V, Str\}$) входных параметров по трем срокам.

$$F^n = (\sum_{t=t_1}^{t_1+2} F_t) / 3 .$$

Сроки осреднения (t_1, t_1+1, t_1+2) задаются в соответствии с таблицей.

Также применяются схемы временного осреднения параметров P_r^n и Adv^n .

Кроме уточнения градаций метеорологических параметров, определяющих подтип МПРЗ, обновленная технология расчетов прогноза МПРЗ включает дополнительные манипуляции, входящие в блоки препроцессора и постпроцессора вычислений: а) пространственное осреднение входных прогностических параметров (скорость и осадки) по сеточному шаблону;

б) введение систематической поправки на скорость ветра в АПС, установленной в ходе производственных испытаний прогноза модельной скорости; в) коррекция МПРЗ в зависимости от типовой синоптической ситуации. Ниже приводится описание новых технологических процедур.

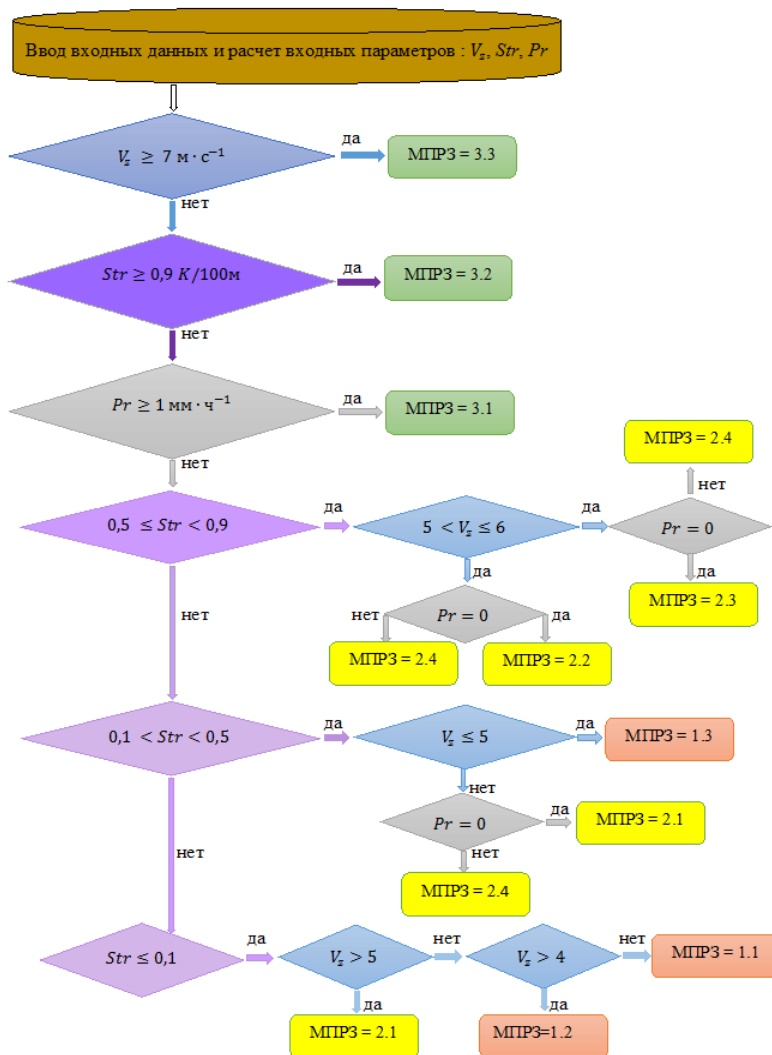


Рис. 2. Блок-схема расчета почасового подтипа МПРЗ (V_z – средняя скорость на высоте 250 м; Str – градиент температуры в нижнем 250-метровом слое; Pr – сумма осадков).

Fig. 2. Block diagram for calculating the hourly subtype of MIPD (V_z – average speed at an altitude of 250 m; Str – temperature gradient in the lower 250-meter layer; Pr – the sum of precipitation).

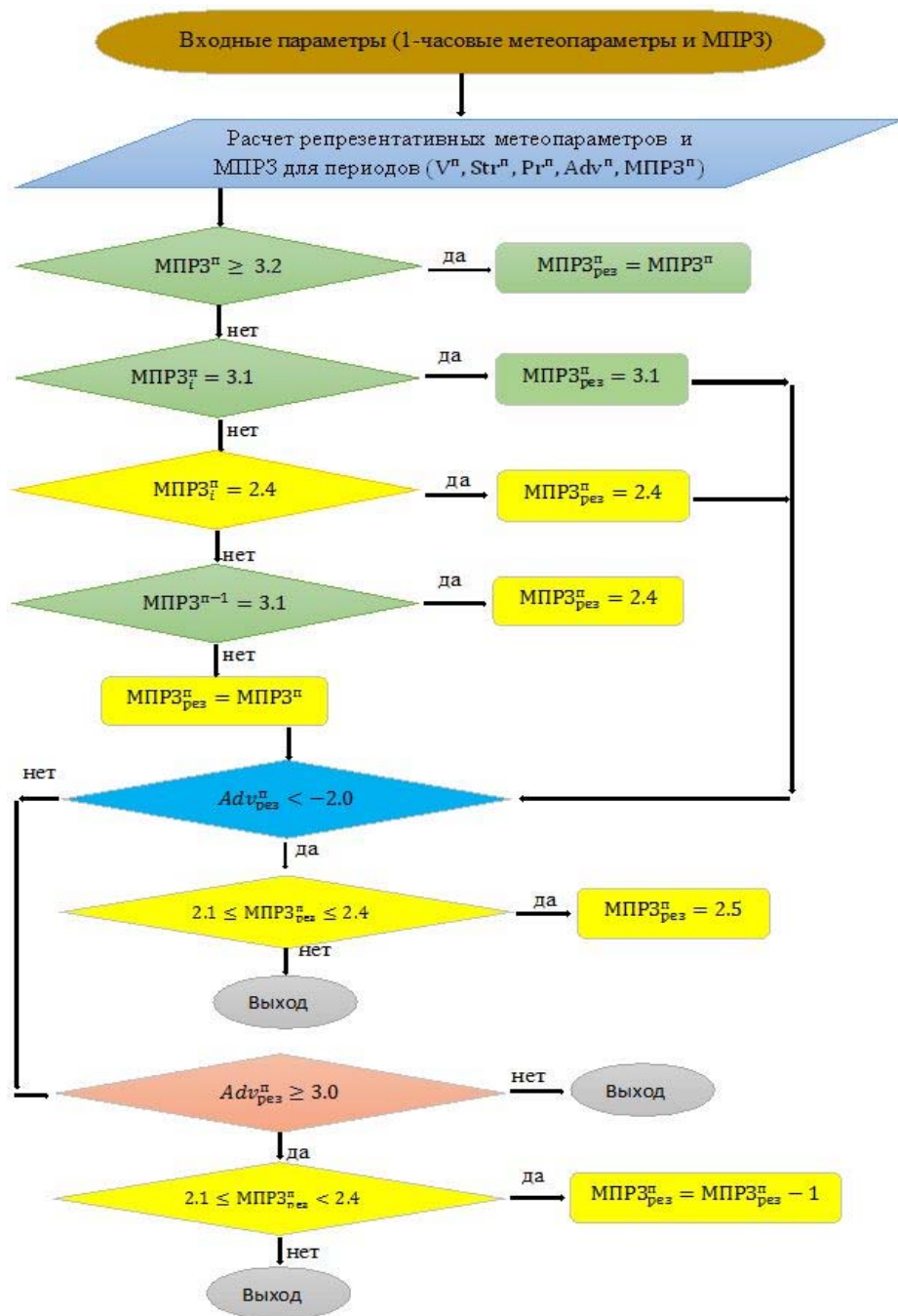
Рис. 3. Блок-схема расчета периодного МПРЗⁿ.Fig. 3. Block diagram of the calculation of the periodic MIPDⁿ.

Таблица. Временные интервалы и периоды осреднения параметров (V , Str) при расчете внутрисуточного МПРЗ^п (время местное)

Table. Time intervals and periods of averaging parameters (V , Str) when calculating intraday MIPD^p (local time)

Период	Вечер 18–23 ч	Ночь 0–6 ч	Утро 7–11 ч	День 12–17 ч
22 сентября – 20 марта	18, 19, 20	1, 2, 3	7, 8, 9	13, 14, 15
21 марта – 20 апреля 22 августа – 21 сентября	20, 21, 22		7, 8, 9	
21 апреля – 21 августа	21, 22, 23		6, 7, 8	

Коррекция скорости ветра на высоте 250 м

Проведенные оценки прогноза скорости ветра в АПС по конфигурации моделей COSMO-Ru07 и COSMO-Ru6ENA в период март 2021 г. – февраль 2022 г. показали преобладающее занижение скорости ветра в градации до $5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ и завышение в интервале более $10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. С целью уменьшения «ложных» прогнозов МПРЗ 1 типа на этапе обработки входных данных (препроцессинг) вводится поправка на скорость ветра для параметра V_z . Тестирование расчетов МПРЗ на введение для V_z поправок $\pm(1-3)$ показали высокую чувствительность алгоритма к величине скорости V_z .

На рис. 4 приводится пример расчетов МПРЗ до и с учетом коррекции скорости ветра. Как видно, «принудительное» увеличение модельной скорости всего на $1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ дает запланированный эффект – сглаживание мелких неоднородностей и сокращение территории с МПРЗ 1 типа.

Осреднение метеорологических параметров по сеточному шаблону

Для осреднения метеорологических параметров в пунктах прогнозирования применяется 25-точечный шаблон по сетке конфигурации модели COSMO-Ru6ENA. Осреднение параметра стратификации производится простым осреднением по всем узлам шаблона, поскольку поле температуры на охваченной шаблоном территории более однородно, чем ветер или осадки (за исключением ситуации с прохождением атмосферного фронта)

$$Str = (\sum_{n=1}^N Str_n) / N,$$

где $N=25$ – число узловых значений в выбранном шаблоне при шаге сетки 6,6 км.

При расчете прогнозов МПРЗ проводится осреднение по шаблону параметра стратификации, а для таблиц профилей осреднение приземной температуры и температуры на высотах в АПС:

$$t = (\sum_{n=1}^N t_n) / N.$$



а)



б)

Рис. 4. Прогноз часового МПРЗ в ЦФО на 19.00 ч 4 августа 2022 г. с применением модельной скорости ветра V_z (а); с введением поправки (V_z+1) м·с⁻¹ (б).

Fig. 4. Forecast of the one-hour MPRZ in the Central Federal District at 7 p.m. on August 4, 2022 using the model wind speed V_z (а); б) with introduction of an amendment (V_z+1) m·s⁻¹ (б).

Подобное осреднение производится для осадков и скорости ветра на 250 м, при этом если прогностическое значение параметра в пункте больше, чем среднее значение по шаблону, то оно не меняется; если меньше среднего, то заменяется средним значением.

Для осадков были проведены 2 эксперимента с осреднением:

- а) $Pr_{cp} = (\sum_{n=1}^N Pr_n) / N$
 $if (Pr_{i,j} \geq Pr_{cp}) Pr = Pr_{i,j}$
 $if (Pr_{i,j} < Pr_{cp}) Pr = Pr_{cp}$
 б) $Pr = \max(Pr_n), n = 1, N.$

В первом варианте (а) осадки в пункте не должны быть меньше среднего значения по шаблону, а во втором варианте (б) осадки в пункте приравниваются максимальному значению, рассчитанному в узлах шаблона. Оба варианта имеют право на существование; в настоящее время технология прогнозов МПРЗ включает первый вариант.

Для скорости ветра применялось осреднение по типу осреднения осадков в первом варианте (а). Такого типа осреднение способствует, в первую очередь, уменьшению влияния модельной ошибки прогноза скорости ветра на расчет МПРЗ, а также приводит к уменьшению «ложных» (страховочных) прогнозов МПРЗ 1 типа, характерных для предыдущей версии технологии.

Для населенных пунктов большой площади, каким является мегаполис Москва, по-видимому, целесообразно представлять расчеты прогностического МПРЗ для нескольких точек. На рис. 5 представлен сеточный шаблон для осреднения метеопараметров для Москвы (ВВЦ, узел i,j).

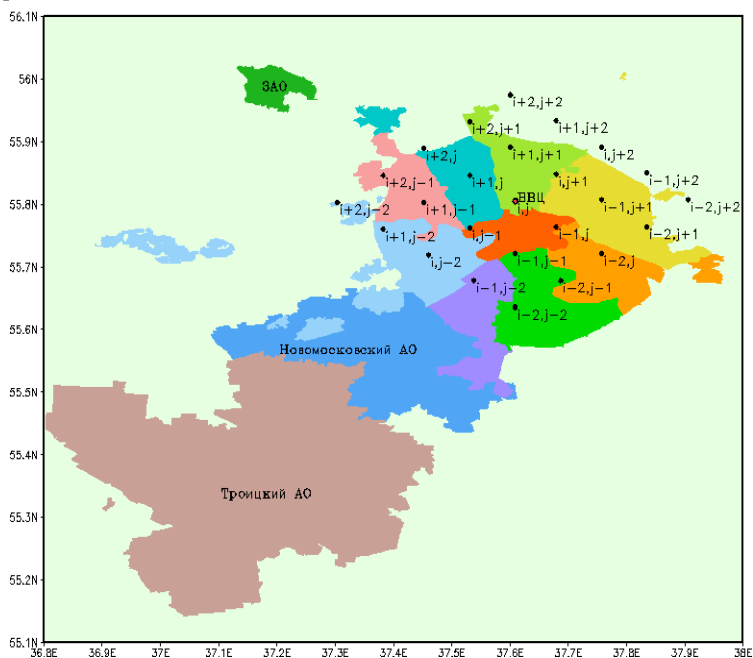


Рис. 5. Пример шаблона осреднения метеопараметров по данным конфигурации модели COSMO-Ru6ENA.

Fig. 5. Example of a pattern for averaging weather parameters based on COSMO-Ru6ENA model configuration data.

Как видно, при таком способе остаются неохваченными юго-западный сектор старой Москвы и вся территория Зеленоградского АО, Новомосковского АО и Троицкого АО.

Для большинства городов России охваченной шаблоном области, по-видимому, достаточно для отражения репрезентативного прогноза МПРЗ.

Коррекция МПРЗ за счет учета типа синоптической ситуации

Регулярный мониторинг качества прогнозов МПРЗ и модельных метеорологических параметров позволил выявить характерные ситуации с ложными тревогами МПРЗ 1 типа. Таковыми оказались малоградиентные области внутри барических депрессий и малоподвижных циклонов, где осадки, вопреки синоптической ситуации, не прогнозируются, а по факту наблюдаются. Для их идентификации в алгоритм был введен параметр типа барического поля (ТБП), рассчитываемый по лапласиану геопотенциала на изобарической поверхности 925 гПа:

$$\text{ТБП} = k \cdot \nabla^2 H_{925},$$

где k – коэффициент, зависящий от горизонтального шага сетки модели и масштабов определяемых типов синоптических процессов; $\nabla^2 H_{925}$ – лапласиан геопотенциала на 925 гПа:

$$\nabla^2 H_{925} = \frac{\partial^2 H_{925}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_{925}}{\partial y^2},$$

x, y – горизонтальные координаты по широте и долготе.

На рис. 6 показано для большей наглядности поле параметра ТБП по ЕТР, которое позволяет выделить барические образования (циклоны, антициклоны, гребни и ложбины).

Нами были подобраны критерии, по которым определяется тип синоптического процесса над прогнозируемой территорией. Корректировка прогнозов МПРЗ с учетом параметра ТБП проводится в областях с циклоническими процессами, поскольку они, безусловно, не являются благоприятными для накопления примесей. При этом проверяется прогностическая величина скорости ветра на высоте 250 м и в случае слабой скорости в АПС в области данного ТБП вносится поправка в окончательный расчет МПРЗ.

На рис. 7 иллюстрируется эффект применения ТБП при расчете МПРЗ. Видно, что благодаря применению ТБП в Южном федеральном округе большая часть зоны с идентификацией «слабое» рассеивание (розовый цвет на рис. 7а) преобразуется в зону с умеренным рассеиванием (желтый цвет на рис. 7б).

В завершении отметим, что для повышения надежности и точности прогнозов МПРЗ авторы стремятся апробировать и применять в своей технологии новейшие достижения разработчиков системы COSMO, в том

числе разработанную в Гидрометцентре России статистическую коррекцию прогнозов погоды с помощью нейронных сетей по модели COSMO [1, 9] (автор – Ф.Л. Быков).

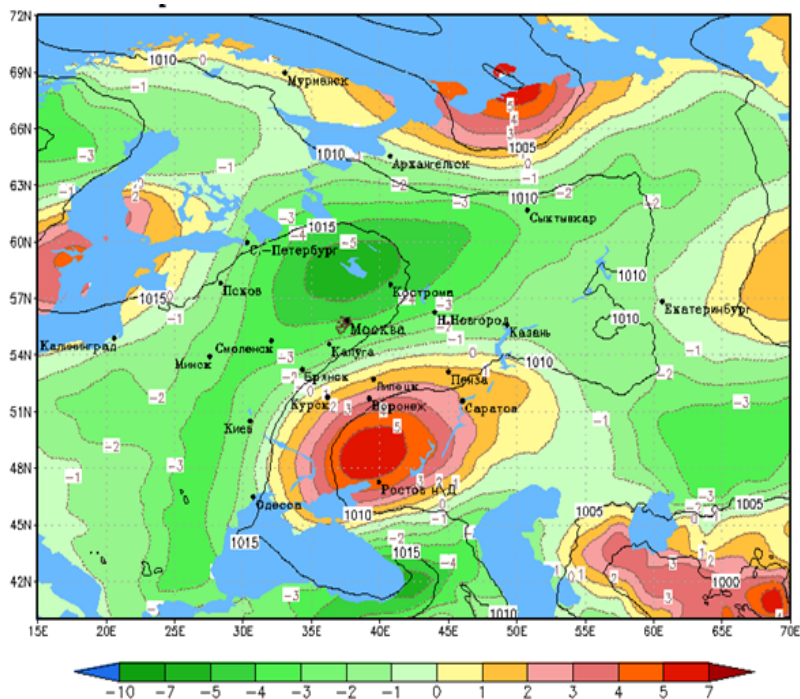


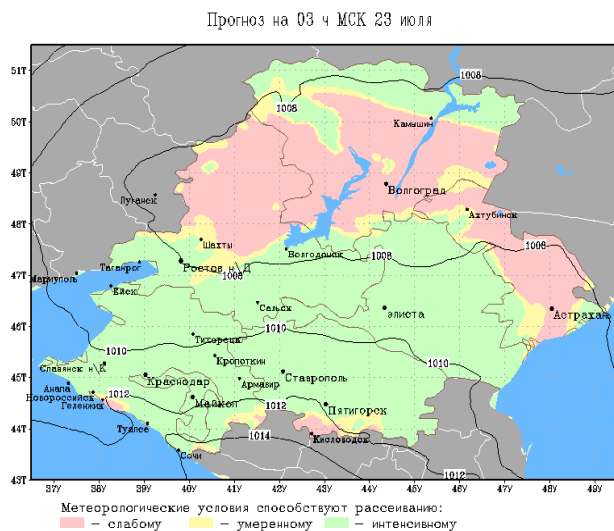
Рис. 6. Прогноз параметра типа барического поля на 03 ч 23 июля 2022 г. (цветовая шкала) и приземного давления (изобары).

Fig. 6. Forecast of the baric field type parameter for 03 h July 23, 2022 (color scale) and surface pressure (isobars).

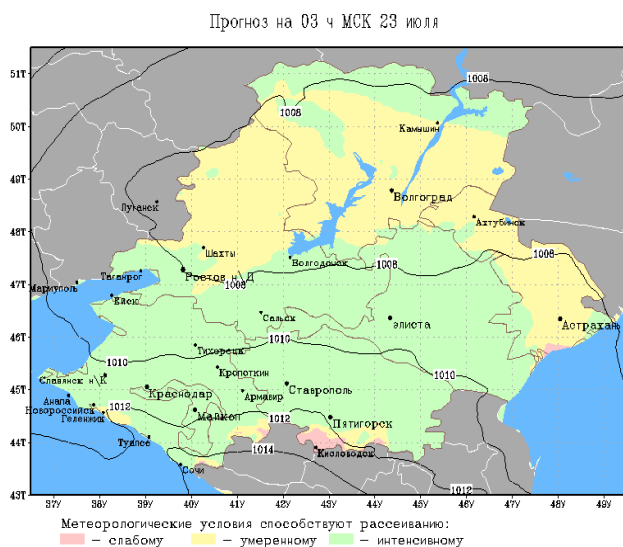
Методика статистической коррекции основана на ансамблевом подходе с применением 8 моделей, который существенно исправляет недостатки прогнозирования по единой системе учета физических процессов в случае использования одной модели. Особенно эффективной статистическая коррекция метеорологических характеристик оказалась в переходные сезоны – в периоды установления и схода снежного покрова, когда модели COSMO конфигурации RuBENA свойственны грубые ошибки прогноза температуры в АПС. Большим достоинством созданной технологии коррекции является открытый доступ для пользователей.

Как показано выше, алгоритм МПРЗ очень чувствителен к точности прогноза стратификации температуры в АПС. В экспериментальном режиме нами были проведены расчеты МПРЗ с учетом статистической коррекции; в наших экспериментах в отдельных пунктах величина коррекции

приземной температуры достигала 7°C . Предварительный анализ экспериментов с включением статистической коррекции показал эффект уменьшения ложных прогнозов метеоусловий накопления (МНРЗ 1 типа) за счет сокращения периодов термической устойчивости, свойственной начальным прогнозам модели конфигурации RuBENA из-за систематического занижения приземной температуры.



а)



б)

Рис. 7. Прогноз МНРЗ на 03 ч 23 июля 2022 г.: без учета ТБП (а), с учетом ТБП (б).

Fig. 7. MIPD forecast for 3 hours on 23 July 2022: excluding BFT (а), including BFT (б).

Иллюстрацию статистической коррекции суточной динамики температуры можно видеть во втором снизу окне метеограммы, приведенной в качестве примера для г. Тюмени (рис. 8). На метеограмме показаны также почасовые прогностические характеристики: вертикальные разрезы поля температуры, скорости и направления ветра в нижнем 500-метровом слое атмосферы (верхние два окна), градиент температуры в слое 0–250 м (третье сверху окно), осадки и приземное давление (четвертое сверху окно). В нижнем окне показан прогноз МПРЗ на каждый час текущих и следующих суток.

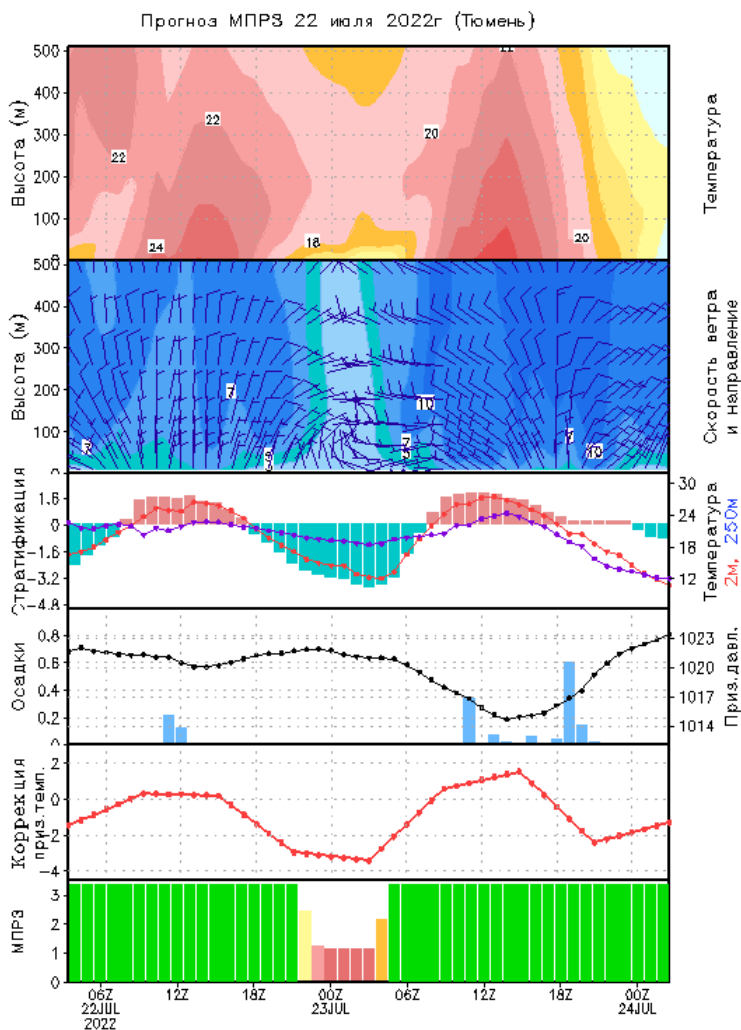


Рис. 8. Прогноз МПРЗ и определяющих его характеристик на 22–23 июля 2022 г.

Fig. 8. Forecast of the MIPD and its defining characteristics for July 22-23, 2022.

Заключение

Для централизованного метеорологического обеспечения сетевых подразделений Росгидромета, выполняющих прогнозирование НМУ и загрязнения воздуха, ежедневно выкладываются на GoogleDisk прогнозы температуры, направления и скорости ветра (приземные и на высотах 100, 200, 300, 500 м и изобарической поверхности 925 гПа), высоты пограничного слоя атмосферы и осадков в виде Excel-таблиц профилей с 3-часовой детализацией, прогнозы часового МПРЗ в виде анимационных карт и прогнозы МПРЗ для внутрисуточных периодов в формате “светофор” в виде Excel-таблиц. Подготовка прогностической информации в технологии основана на прогностических данных конфигурации модели COSMO-Ru6ENA по исходным срокам 00Н и 12Н.

По результатам верификации алгоритма МПРЗ с использованием данных измерений концентраций загрязняющих веществ на 40 АСКЗА, с учетом полученных в ходе производственных испытаний характеристик качества модельных прогнозов скорости ветра и температуры в АПС, усовершенствован алгоритм расчета МПРЗ, оптимизирована процедура пространственного осреднения входящих в расчет МПРЗ метеорологических параметров, разработаны способы их коррекции на этапе препроцессинга. Выполненное усовершенствование технологии позволило уменьшить число ложных прогнозов МПРЗ 1 типа, представляющих диапазон метеорологических условий, способствующих накоплению загрязнений в приземном воздухе.

Работа выполнена в рамках исследований по плану ЦНТП Росгидромета НИТР 1.1.6.

Список литературы

1. Быков Ф.Л. Статистическая коррекция прогнозов погоды по модели COSMO с помощью нейронных сетей // Метеорология и гидрология. 2020. № 3. С. 5-20.
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. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58, №1 С. 92-108. DOI: 10.31857/s0002351522010023
3. Локощенко М.А., Богданович А.Ю., Еланский Н.Ф., Лезина Е.А. Температурные инверсии в Москве и их влияние на состав приземного воздуха // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57, № 6. С. 1-10.
4. 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 DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-3-131-149>
5. Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Глазкова А.А., Захарова П.В., Лезина Е.А., Звягинцев А.М. Неблагоприятные для качества воздуха метеорологические факторы // Труды Гидрометцентра России. 2014. Вып. 351. С. 154-172.
6. РД 52.04.306-92. Охрана природы. Атмосфера. Руководство по прогнозу загрязнения воздуха.

7. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Шатунова М.В., Чубарова Н.Е., Алферов Д.Ю., Варенцов М.И., Захарченко Д.И., Копейкин В.В., Никитин М.А., 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. 27-53.

8. 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., Ретина 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.

9. Bykov Ph.L. Optimal interpolation of inhomogeneous fields using neural networks // Research activities in Earth system modelling. Working Group on Numerical Experimentation. 2021. P. 1-03

References

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

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. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 2022, vol. 58, pp. 80-94. DOI: 10.1134/S0001433822010029.

3. Lokoshchenko, M.A., Bogdanovich, A.Y., Elansky, N.F. et al. Thermal Inversions and Their Influence on the Composition of the Surface Air Layer over Moscow. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 2021, vol. 57, pp. 559-567. DOI: 10.1134/S0001433821060086.

4. Kuznetsova I.N., Tkacheva Yu.V., Shalygina I.Yu., Nakhaev M.I. Forecasting a meteorological indicator of pollutant dispersion in surface air. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2021, vol. 381, no. 3, pp. 131-149. DOI: 10.37162/2618-9631-2021-3-131-149 [in Russ.].

5. Kuznetsova I.N., Shalygina I.Yu., Nakhaev M.I., Glazkova A.A., Zakharova P.V., Lezina E.A., Zvyagintsev A.M. Meteorological factors unfavourable for air quality. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2014, vol. 351, pp. 154-172 [in Russ.].

6. RD 52.04.306-92. Oхрана природы. Атмосфера. Руководство по прогнозу загрязнениа воздуха [in Russ.].

7. 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. 27-53 [in Russ.].

8. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Vil'fand R.M. et al. 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.

9. Bykov Ph.L. Optimal interpolation of inhomogeneous fields using neural networks. Research activities in Earth system modelling. Working Group on Numerical Experimentation, 2021, pp. 1-03.

Поступила 26.08.2022; одобрена после рецензирования 07.09.2022;
принята в печать 23.10.2022.

Submitted 26.08.2022; approved after reviewing 07.09.2022;
accepted for publication 23.10.2022.