

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-3-131-149>

УДК 504.3.054+504.06+505.75

Прогнозирование метеорологического показателя рассеивания загрязняющих веществ в приземном воздухе

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

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

Представлен усовершенствованный алгоритм расчета метеорологического показателя рассеивания загрязнений в приземном воздухе (МПРЗ) с использованием прогностических данных модели COSMO-Ru7 с дискретностью 1 час. С помощью МПРЗ как функции скорости переноса и термической стратификации в атмосферном пограничном слое, осадков и адвективных изменений температуры весь диапазон влияющих на рассеивание загрязнений атмосферных условий разделяется на три типа – слабое (первый тип), умеренное (второй тип), сильное (третий тип) рассеивание. Худшие условия рассеивания примеси представляет МПРЗ первого типа; определяющий его набор метеорологических параметров соответствует неблагоприятным метеорологическим условиям (НМУ), способствующим накоплению загрязняющих веществ в приземном воздухе. Предложенная детализация внутри каждого типа МПРЗ в виде подтипов может быть использована при прогнозировании НМУ для одиночных источников. Приводятся иллюстрации связи МПРЗ с колебаниями уровня загрязнения воздуха в эпизодах НМУ, используя для этого данные автоматизированных измерений концентрации загрязняющих веществ и срочных сетевых измерений. Предложен и реализован алгоритм вероятностного прогноза МПРЗ, позволяющий учитывать неопределенность прогноза при составлении предупреждений о НМУ.

Ключевые слова: метеорологические условия загрязнения воздуха, неблагоприятные метеорологические условия, численный прогноз

Forecasting a meteorological indicator of pollutant dispersion in surface air

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

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia
muza@mecom.ru; shalygina@mecom.ru*

An improved algorithm for calculating a meteorological indicator of pollution dispersion in surface air (MIPD) using the COSMO-Ru7 configuration forecast data with a discreteness of 1 hour is presented. Using the MIPD as a function of the transport rate and thermal stratification in the atmospheric boundary layer, precipitation and advective temperature changes, the entire range of atmospheric conditions affecting the dispersion of pollutants is divided into three types: weak (the first type), moderate (the second type),

and strong (the third type) dispersion. The worst conditions for the pollutant dispersion are provided by the MIPD of the first type; the set of meteorological parameters that determines it corresponds to adverse weather conditions (AWC) that contribute to the accumulation of pollutants in surface air. The proposed detailing within each type of MIPD in the form of subtypes can be useful for predicting AWC for single sources. Illustrations of the MIPD connection with fluctuations in the level of air pollution during the AWC episodes are given using automated measurements of pollutant concentration and fixed network measurements. An algorithm for the probabilistic forecasting of the MIPD, that allows taking into account the uncertainty of the forecast when issuing AWC warnings, is proposed and implemented.

Keywords: meteorological conditions of air pollution, adverse weather conditions, numerical prediction

Введение

В Европейском Союзе (ЕС) задачи, связанные с загрязнением воздуха, выполняет служба CAMS (The Copernicus Atmosphere Monitoring Service), одним из сервисов которой является бесплатное предоставление данных и информации для решения экологических проблем в ЕС. Европейская система экологического мониторинга построена на строгом контроле выбросов загрязняющих веществ в атмосферу в соответствии с установленными требованиями. CAMS ежедневно распространяет трехдневные прогнозы концентраций основных загрязнителей с шагом сетки около 10 км на основе ансамблевого расчета химических транспортных моделей, сосредотачиваясь на распространении пыли, продуктов природных пожаров, содержании PM_{10} и приземного озона (<https://atmosphere.copernicus.eu/>). Европейская система предупреждений о неблагоприятных метеорологических условиях настроена на оповещение о наступлении эпизодов опасного загрязнения воздуха и регулировании транспорта при высоком загрязнении воздуха.

В нашей стране создана система регулирования выбросов загрязняющих веществ в атмосферу предприятиями для снижения техногенной нагрузки на окружающую среду при неблагоприятных метеорологических условиях (НМУ), способствующих накоплению вредных веществ в приземном воздухе. Регулирование выбросов как компромисс из-за практической невозможности требовать от предприятий безопасного объема выбросов в атмосферу предусматривается при НМУ. Министерство природных ресурсов и экологии РФ юридически закрепило обязанность таких мероприятий (Приказ от 28 ноября 2019 г. № 811 "Об утверждении требований к мероприятиям по уменьшению выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в периоды неблагоприятных метеорологических условий"), тем самым повысив значимость прогнозирования НМУ.

На городской территории множество источников, включая практически равномерно распределенный транспорт, формируют совокупный городской фон воздушного загрязнения. Выделить «зону влияния» отдельного городского источника в городе практически невозможно.

Вместе с тем физические свойства большинства попадающих в атмосферу первичных загрязняющих веществ и зависимость их распространения от атмосферных условий являются базовой основой для предсказания процесса накопления или рассеивания примеси, используя для этого прогностические характеристики термической и ветровой стратификации в атмосферном пограничном слое.

Следует отметить, что часть загрязняющих веществ (фенол, формальдегид и т. п.), помимо прямых выбросов от различных производств, образуются в атмосфере из выхлопных газов неполного сгорания, другие (например, озон) – в ходе фотохимических реакций. Такие, так называемые «специфические», загрязнители имеют несовпадающий с основными загрязнителями сезонный и суточный ход и неустойчивые связи с метеорологическими условиями. Но большая часть изменчивости городского загрязнения происходит под влиянием атмосферных условий макро- и мезомасштаба, механизм рассеивания примеси в пограничном слое известен и детально изучен.

В системе Росгидромета выполняется прогнозирование метеорологических условий и загрязнения воздуха для городских территорий (в целом по городу) и для отдельных источников, главной целью которого является заблаговременное предупреждение о метеорологических условиях, способствующих увеличению загрязнения приземного воздуха. При прогнозировании НМУ для одиночных источников используются установленные на этапе утверждения предельно допустимых выбросов (ПДВ) источника характеристики ветра и стратификации температуры в атмосферном пограничном слое (АПС). Для прогноза НМУ в целом по городу (поселению) применяется метеорологический показатель усредненных по территории условий рассеивания или накопления загрязнений [1]. Таким показателем в соответствии с действующим руководящим документом РД 52.04.306-92 [7] является синоптический предиктор (Sn). Проведенный авторами анализ применяемого Sn в подразделениях Росгидромета, выполняющих прогнозирование загрязнения воздуха, позволяет сделать выводы о недостаточном научном обосновании используемых на практике метеорологических предикторов и необходимости их усовершенствования с учетом современных возможностей численного моделирования.

В Гидрометцентре России выполнен цикл работ по усовершенствованию синоптического параметра, рекомендованного в РД 52.04.306-92, разд. 7.4 [7] для использования в качестве синоптического предиктора в схемах прогнозирования уровня загрязнения воздуха в целом по городу. Метод прошел апробацию в ряде подразделений Росгидромета; решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и геофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 1 декабря 2017 г. методика прогнозирования НМУ с использованием расчетов мезомасштабных численных моделей атмосферы рекомендована к применению в оперативной практике (<http://method.meteorf.ru/cmkp/dec17.html>).

В представленной публикации описывается усовершенствованный метод прогноза МПРЗ, внесенные в последние годы изменения в технологию оперативного прогнозирования МПРЗ и метеорологических характеристик, используемых для прогнозирования НМУ в целом по городу и от одиночных источников.

Краткое описание метода расчета МПРЗ

Метод расчета МПРЗ основан на учете физических атмосферных процессов, влияющих на распространение примеси в нижних слоях атмосферного пограничного слоя. При изучении связей метеорологических параметров с осредненными по городу концентрациями CO , NO_2 и PM_{10} в московском регионе установлены наиболее значимые метеорологические характеристики: средняя скорость переноса в нижних слоях атмосферы (V_h), вертикальное перемешивание в виде параметра стратификации (S_h), осадки (Pr), адвективное изменение температуры (Adv) [6]. Каждый параметр выражается количественной величиной, МПРЗ представляет собой функцию:

$$\text{МПРЗ} = f(V_h, S_h, Pr, Adv), \quad (1)$$

где h – высота подслоя в АПС, превышающая высоту приземного слоя и максимальные высоты труб промышленных предприятий; при расчетах параметров МПРЗ используется модельный уровень, близкий к 350 м; S_h – параметр стратификации в слое h : $S_h = 1$ соответствует инверсионному профилю температуры, $S_h = 2$ – стратификация от слабо устойчивой до слабо неустойчивой, $S_h = 3$ – термическая неустойчивость.

МПРЗ по совокупности метеорологических параметров (V_h, S_h, Pr, Adv) характеризует интенсивность рассеивания загрязняющих веществ, предусматривая разделение полного диапазона рассеивания на 1 – слабое, 2 – умеренное, 3 – сильное (табл. 1). В табл. 1 показаны также подтипы МПРЗ (см. описание ниже).

Комплексы метеорологических характеристик (V_h, S_h, Pr, Adv), чаще всего сопровождающиеся повышением средних городских концентраций загрязняющих веществ до величин, в 1,5 и более раза превышающих уровень городского загрязнения при сильном рассеивании, отнесены к МПРЗ первого типа. Этот тип МПРЗ характеризует метеорологические условия, способствующие накоплению загрязнений в приземном воздухе, и если он сохраняется от нескольких часов до суток, то может идентифицироваться как НМУ городского масштаба. На статистически достоверном материале установлено, что в Москве в вечерние и утренние часы (пиковые транспортные потоки) достаточно 4–6 часов для резкого повышения

уровня загрязнения и достижения более чем 1,5-кратного его повышения [6, 10].

Таблица 1. Количественные характеристики типов и подтипов МПРЗ
Table 1. Quantitative characteristics of MIPD types and subtypes

МПРЗ		V_h , м/с	S_h , °С/100м	Pr , мм/1ч	Adv , °С/1ч
Тип	Подтип				
1	1	≤ 3	1	нет	$ Adv < A_{крит}$
	2	≤ 3	2	нет	$ Adv < A_{крит}$
	3	$3 < V_h < 5$	1	нет	$ Adv < A_{крит}$
2	1	$5 \leq V_h < 7$	1	$< 0,3$	$ Adv < A_{крит}$
	2	$3 < V_h < 7$	2	нет	$ Adv < A_{крит}$
	3	< 5	любая	$< 0,3$	$ Adv \geq A_{крит}$ (тепла)
	4	< 5	3	$< 0,3$	$ Adv < A_{крит}$
	5	< 5	1, 2	$Pr_{min} \leq Pr < 0,3$	$ Adv < A_{крит}$
3	1	$5 < V_h < 7$	2	$Pr_{min} \leq Pr < 0,3$	$ Adv < A_{крит}$
	2	$5 < V_h < 7$	3	$< 0,3$	$ Adv < A_{крит}$
	3	$7 \leq V_h < 10$	любая	$< 0,3$	$ Adv < A_{крит}$
	4	< 5	любая	$< 0,3$	$Adv \leq -A_{крит}$ (холода)
	5	$5 \leq V_h < 10$	любая	$< 0,3$	$ Adv \geq A_{крит}$
	6	< 10	любая	$\geq 0,3$	любая
	7	≥ 10	любая	любые	любая

Примечание. $Pr_{min} = 0,01$ мм/1ч – минимальное количество учитываемых осадков; $A_{крит} = 1,5$ °С/3ч – критическая величина адвекции, начиная с которой учитывается ее влияние.

Второй тип интенсивности рассеивания (МПРЗ =2) характеризует преобладание ослабленных процессов вертикального и горизонтального перемешивания, что может способствовать повышению загрязнения первичными загрязняющими веществами, оставаясь на большей части города ниже уровня загрязнения при НМУ. При этом на подветренной территории отдельных источников концентрации загрязняющих веществ могут приближаться к уровням, соответствующим критериям НМУ.

Принимая во внимание узкие диапазоны величин, определяющих НМУ для отдельных источников [7], предложено по комбинациям количественных характеристик (V_h, S_h, Pr, Adv) внутри каждого типа МПРЗ выделять подтипы. В первом типе МПРЗ (слабое рассеивание) содержатся три подтипа, во втором выделено 5 подтипов, в третьем – 7 подтипов. Практикующие специалисты, используя классификацию подтипов, имеют возможность получить более детальную информацию об ожидаемых

атмосферных процессах. Например, при подтипах МПРЗ, равных 1.1 и 1.3, в инверсионных условиях при отсутствии осадков скорость переноса в АПС в первом случае очень слабая и ситуация соответствует НМУ практически для всех низких (с высотой выбросов до 50 м) источников, во втором случае (подтип МПРЗ = 1.3) НМУ может соответствовать критериям лишь части одиночных источников. В отдельный подтип выделена ситуация с адвекцией более теплого воздуха при скорости до 5 м/с и слабых (морозящих) осадках, которая характерна для теплых секторов циклонов, часто при наличии адвективных туманов. Напротив, адвекция холодного воздуха (подтип МПРЗ = 3.4) является достаточной для идентификации условий, способствующих очищению воздуха, поскольку сопровождается чаще всего термической неустойчивостью. При интенсивном рассеивании или сильных осадках (тип МПРЗ = 3) накопления загрязняющих веществ в приземном воздухе не происходит, что способствует низкому уровню антропогенного загрязнения приземного воздуха.

Необходимо отметить, что метод МПРЗ не предназначен для применения при прогнозировании загрязнения воздуха а) специфическими веществами тяжелее воздуха (например, метилмеркаптан, сероводород и т. п.), содержание и изменчивость которых мало зависят от погодных условий; б) вторичными загрязнителями, образующимися в результате фотохимических реакций с участием первичных загрязняющих веществ (например, озон, формальдегид и т. п.).

Расчет прогностических характеристик и МПРЗ

Прогноз МПРЗ рассчитывается по прогностическим данным оперативной системы численного прогноза погоды COSMO-Ru [8] с шагом сетки 7 км для ЕТР, 6,6 км – для Азиатской территории России на период до 2–3 суток с временной дискретностью 1 час.

Входными параметрами для прогноза МПРЗ (1) являются:

а) скорость ветра ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$) на высоте $h \approx 350$ м:

$$V_h = \sqrt{u_h^2 + v_h^2}, \quad (2)$$

где u_h , v_h – составляющие скорости ветра на верхней границе слоя ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$);

б) вертикальный градиент температуры в слое (К/100 м) для определения параметра стратификации (S_h):

$$\gamma = \frac{T_{2\text{м}} - T_h}{h - 2} \cdot 100, \quad (3)$$

где $T_{2\text{м}}$ – приземная температура (К); T_h – температура на верхней границе слоя (К).

Параметр стратификации

$$S_h = \begin{cases} 1 & \text{при } \gamma \leq -0,1 \\ 2 & \text{при } -0,1 < \gamma < 0,3, \\ 3 & \text{при } \gamma \geq 0,3 \end{cases} \quad (4)$$

в) количество осадков (Pr , мм/1ч); $Pr_{min} = 0,01$ мм – количество осадков за 1 ч, которое становится значимым при расчете МПРЗ;

г) адвекция температуры в свободной атмосфере (Adv , К/1ч) рассчитывается по данным температуры на изобарической поверхности 850 гПа:

$$Adv = T_{850}^{t+1} - T_{850}^t, \quad (5)$$

где T_{850}^t и T_{850}^{t+1} – температура 850 гПа (К) на временных шагах t и $t+1$.

$Adv_{min} = 0,5$ °С/1ч – величина, начиная с которой учитывается влияние адвекции

Технология прогнозирования

Учитывая суточные циклы атмосферных параметров, а также трудности с практическим использованием часовых прогнозов численной модели, предложено определять МПРЗ для четырех внутрисуточных периодов: утро (7–10 ч), день (11–17 ч), вечер (18–23 ч), ночь (0–6 ч) по осредненным за период значениям параметров (V_h, S_h, Pr, Adv).

Поскольку входные метеорологические параметры для прогноза МПРЗ могут содержать неточности, при прогнозировании МПРЗ на ограниченной городской территории необходимо учитывать пространственный разброс метеопараметров путем осреднения по окружающим узлам сетки. Проводится осреднение по 9-точечному шаблону модельной сетки; такая процедура осреднения позволяет получить прогностические значения параметров, соответствующих среднему значению для пункта прогноза. По комплексу осредненных характеристик (V_h, S_h, Pr, Adv) определяется тип и подтип МПРЗ.

Процедура осреднения по времени и территории позволяет уменьшить неопределенность метеорологического прогноза и минимизировать влияние ошибок COSMO-Ru7 на расчет МПРЗ.

Поле прогностического типа МПРЗ в узлах сетки COSMO-Ru рассчитывается для всей территории России. Принимая во внимание число часовых поясов, технология настроена на расчеты МПРЗ по местному времени начиная со дня текущих суток, заканчивая вечером следующих суток.

Для каждого федерального округа подготавливается визуализированный на географической основе анимированный почасовой прогноз МПРЗ на весь прогностический период. Пример прогноза МПРЗ представлен на рис. 1.

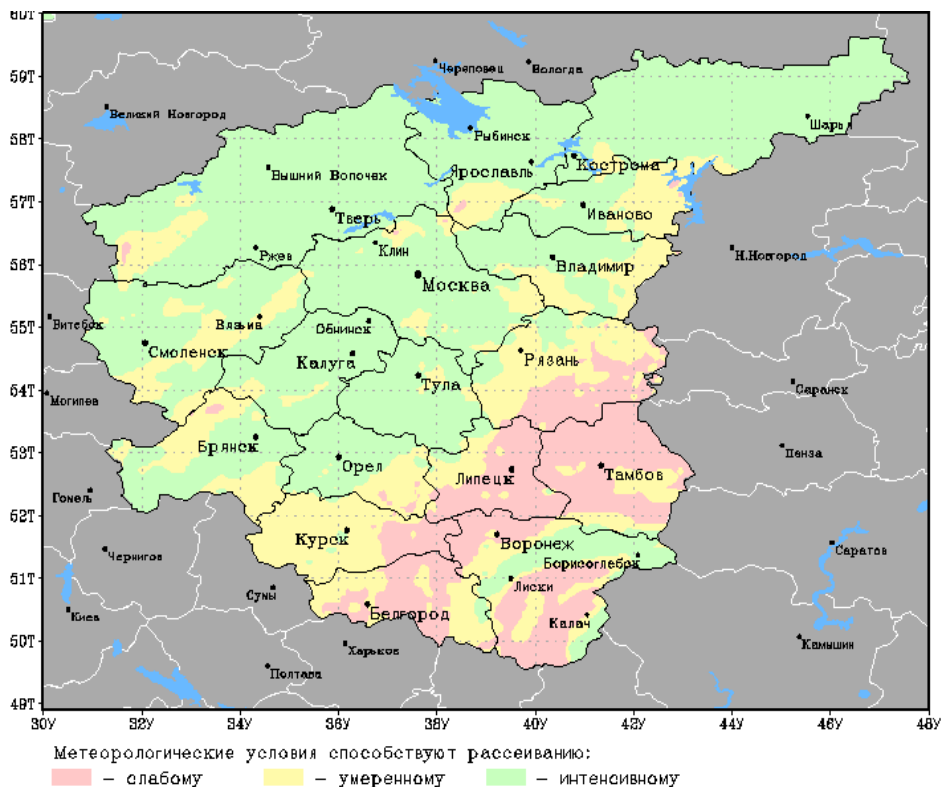


Рис. 1. Прогноз МПРЗ для ЦФО на 20 ч 19 июля 2021 г.

Fig. 1. MIPD forecast for the Central Federal District for 20 hours on July 19, 2021.

Прогнозы МПРЗ рассчитываются не только по всей сеточной области модели, но и для согласованных с потребителями пунктов. В табл. 2 приводится пример ежедневного прогноза подтипов МПРЗ для городов Центрального федерального округа с внутрисуточной детализацией (левая часть таблицы); правая часть таблицы отображает тот же прогноз типов МПРЗ в виде цветов светофора, позволяющих провести экспресс-анализ общей ситуации и возможности наступления НМУ на территории.

Из-за отсутствия данных непрерывных измерений метеорологических характеристик в АПС, диагностика МПРЗ может быть выполнена только по данным радиозондирования и наземных наблюдений в 00 и 12 ч ВСВ. В настоящее время разрабатывается методика оценки прогноза МПРЗ, основанная на применении численных прогнозов COSMO-Ru7. Другим способом верификации метода расчета МПРЗ является анализ связей МПРЗ с загрязнением приземного воздуха; некоторые иллюстрации изменчивости загрязнения воздуха при разных типах МПРЗ приводятся в следующем разделе.

Таблица 2. Прогноз МПРЗ на 19–20 июля 2021 г. в 40 городах ЦФО
Table 2. MIPD forecast for July 19-20, 2021 in 40 cities of the Central Federal District

Исходная дата:	19.07.2021												Прогноз от 11 ч текущих суток до 23 ч следующих суток											
Прогноз метеорологических условий распространения																								
Станции	МПРЗ (тип, подтип)						МПРЗ в системе «светофор»																	
	текущие сутки			следующие сутки			текущие сутки			следующие сутки														
	день	вечер	ночь	утро	день	вечер	день	вечер	ночь	утро	день	вечер												
	11-17ч	18-23ч	0-6 ч	7-10 ч	11-17ч	18-23ч	11-17ч	18-23ч	24-30ч	31-34ч	35-41ч	18-23ч												
Москва	3.2	3.2	2.4	3.4	3.2	2.2	●	●	●	●	●	●												
Воскресенск	2.4	1.3	2.1	3.3	3.2	3.3	●	●	●	●	●	●												
Клин	3.2	3.5	3.3	3.5	3.3	3.3	●	●	●	●	●	●												
Коломна	3.2	2.2	3.3	3.3	3.2	3.3	●	●	●	●	●	●												
Мытищи	3.2	3.2	2.4	3.5	3.2	2.1	●	●	●	●	●	●												
Подольск	2.4	2.2	2.4	3.2	3.2	3.3	●	●	●	●	●	●												
Серпухов	3.2	1.2	3.1	3.2	3.2	3.3	●	●	●	●	●	●												
Щелково	3.2	2.2	2.4	3.4	3.2	2.1	●	●	●	●	●	●												
Электросталь	3.2	1.3	3.3	3.2	3.2	2.1	●	●	●	●	●	●												
Белгород	2.4	2.2	2.1	3.2	3.2	2.2	●	●	●	●	●	●												
Брянск	2.4	2.4	1.3	2.4	2.4	1.3	●	●	●	●	●	●												
Владимир	3.2	2.2	3.4	1.1	3.2	3.3	●	●	●	●	●	●												
Воронеж	2.3	2.2	1.1	2.4	2.4	3.3	●	●	●	●	●	●												
Иваново	3.2	1.3	3.4	3.6	3.2	3.7	●	●	●	●	●	●												
Калуга	2.4	2.4	3.3	3.2	3.2	3.3	●	●	●	●	●	●												
Обнинск	2.4	2.2	3.5	3.2	3.2	3.3	●	●	●	●	●	●												
Кострома	3.2	2.2	3.4	2.4	3.3	3.3	●	●	●	●	●	●												
Волгореченск	3.2	2.1	3.6	3.6	3.3	3.3	●	●	●	●	●	●												
Шарья	2.4	3.3	1.1	2.4	3.4	3.5	●	●	●	●	●	●												
Курск	2.4	1.2	1.2	3.4	2.3	3.2	●	●	●	●	●	●												
Липецк	2.4	1.1	1.1	2.4	3.5	3.3	●	●	●	●	●	●												
Орел	2.4	2.4	3.2	3.3	3.2	2.1	●	●	●	●	●	●												
Рязань	2.4	2.2	1.3	3.3	3.2	3.3	●	●	●	●	●	●												
Новомичуринск	2.4	1.1	1.1	3.6	2.4	3.3	●	●	●	●	●	●												
Касимов	3.2	3.3	1.3	3.3	2.4	3.3	●	●	●	●	●	●												
Михайлов	2.4	2.4	2.2	3.6	3.2	3.7	●	●	●	●	●	●												
Смоленск	2.4	2.2	2.1	2.4	2.4	2.2	●	●	●	●	●	●												
Вязьма	2.4	2.2	2.2	3.3	3.2	2.1	●	●	●	●	●	●												
Тамбов	2.4	1.1	1.3	2.2	2.4	3.3	●	●	●	●	●	●												
Тверь	3.5	3.3	3.4	3.2	3.2	3.3	●	●	●	●	●	●												
Вышний Волочек	3.2	3.3	2.1	3.5	3.3	3.3	●	●	●	●	●	●												
Ржев	2.3	3.3	2.1	3.2	3.2	3.3	●	●	●	●	●	●												
Тула	2.4	2.2	3.6	3.6	3.5	3.7	●	●	●	●	●	●												
Новомосковск	2.4	1.2	3.3	3.6	3.2	3.3	●	●	●	●	●	●												
Узловая	2.4	1.2	3.6	3.6	3.5	3.3	●	●	●	●	●	●												
Ясная Поляна	2.4	1.3	3.7	3.6	2.3	3.3	●	●	●	●	●	●												
Ярославль	3.5	2.2	2.5	3.5	2.3	2.1	●	●	●	●	●	●												
Переславль-Зал.	2.3	1.3	1.1	3.5	3.3	3.3	●	●	●	●	●	●												
Рыбинск	3.2	2.2	3.5	3.2	3.5	3.7	●	●	●	●	●	●												
Тутаев	3.2	2.2	3.1	3.3	3.5	1.3	●	●	●	●	●	●												

●	слабое рассеивание
●	умеренное рассеивание
●	интенсивное рассеивание

Связь МПРЗ с загрязнением городского воздуха

При разработке метода алгоритм расчета МПРЗ верифицировался по данным автоматизированных измерений приземных концентраций загрязняющих веществ в московском регионе ГПБУ «Мосэкомониторинг» (<https://mosecom.mos.ru/>). Принимались во внимание связанные с метеорологическими условиями типовые внутрисуточные и сезонные циклы загрязняющих веществ в городской атмосфере, в частности описанные в работах авторов [5, 10] и других исследователей [2–4], в том числе и зарубежных [11–16].

Регулярно наблюдающиеся отклонения концентраций загрязнений от типовых циклов связаны с влиянием внешних нефизических факторов, к числу которых относятся переменная загруженность автодорог, ремонтные строительные и дорожные работы, поступление задымленного воздуха от природных пожаров и т. п. То есть при одних и тех же атмосферных условиях поле концентраций загрязняющих веществ на территории города может существенно различаться как по конфигурации, так и локально по значениям концентраций.

Некоторые авторы отмечают наличие максимума в недельном цикле среднего по городу уровня загрязнения воздуха. Так, в [2, 3] показано, что в Москве наиболее загрязненным первичными примесями воздух в среднем бывает в четверг, а максимальные уровни приземного озона в летний период чаще всего фиксируются в выходные дни. Еще одним нефизическим фактором влияния на загрязнение городского воздуха является возрастание загруженности автодорог в пятницу и выходные, связанное с выездом горожан в места отдыха и возвращением к началу рабочей недели.

Примером проявления внешних факторов могут служить данные изменчивости загрязнения воздуха в Москве в эпизоде НМУ 23–25 сентября 2020 г. На рис. 2 показаны измеренные на автоматизированных станциях контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) концентрации NO_2 , PM_{10} и CO (<https://mosecom.mos.ru/>). Здесь же представлены диагностические почасовые величины подтипов МПРЗ, рассчитанные с использованием данных измерений температуры и скорости ветра на телебашне Останкино.

В первую очередь отметим, что приведенные на рис. 2 данные свидетельствуют о тесной связи МПРЗ с колебаниями уровня загрязнения NO_2 , PM_{10} и CO в эпизоде. Так, при $\text{МПРЗ} > 3$ 22 сентября из-за сильного ветра и днем 23 сентября в условиях термической неустойчивости (рис. 3) содержание загрязняющих веществ в приземном воздухе было небольшим, близким к фону.

Вечером 23 сентября с уменьшением вертикального градиента до $0,5\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ м}$ при слабом ветре в АПС виден быстрый рост загрязнения, в 19 ч уже при инверсии температуры был достигнут пик загрязнения по всем веществам, который продержался до полуночи (рис. 2).

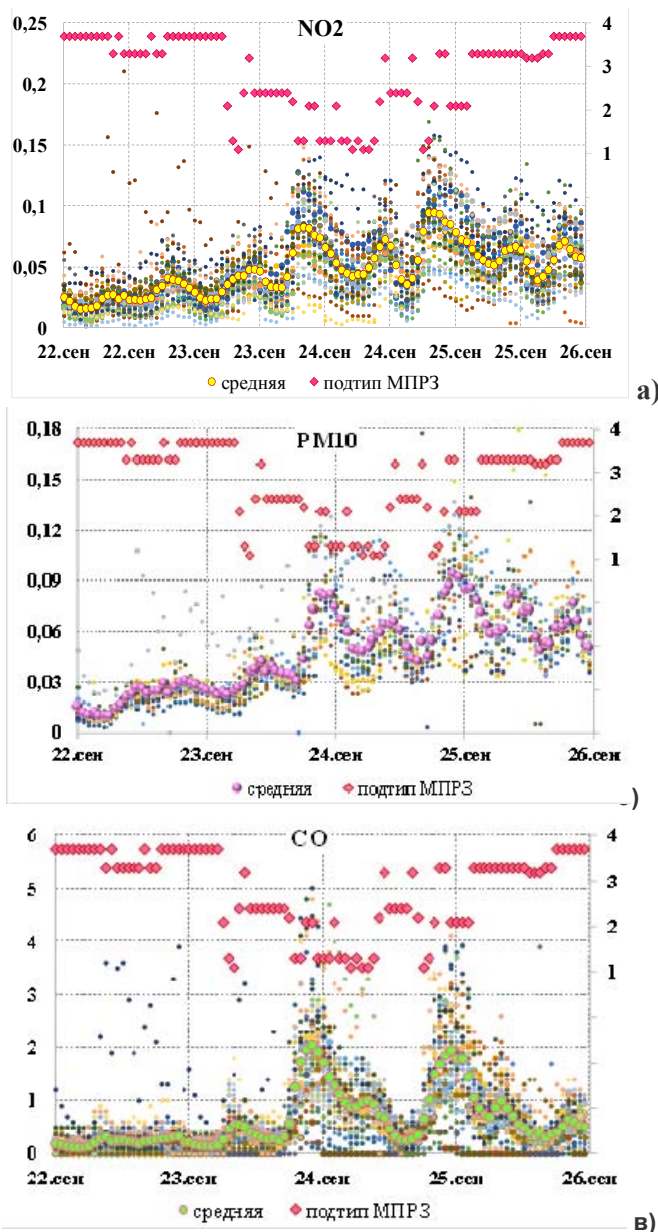


Рис. 2. Концентрация загрязняющих веществ ($\mu\text{г}/\text{м}^3$) по измерениям на АСКЗА (основная вертикальная шкала – мелкие маркеры) и средняя по городу концентрация / Подтипы МПРЗ (вспомогательная вертикальная шкала). Эпизод НМУ / Подтипы МПРЗ (23–25 сентября 2020 г., г. Москва).
Fig. 2. The concentration of pollutants ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) according by measurements at automatic pollution measuring stations (the main vertical scale – small markers) and the average concentration in the city. Subtypes of the MIPD (secondary vertical scale). Episode of UMC on September 23–25, 2020, Moscow.

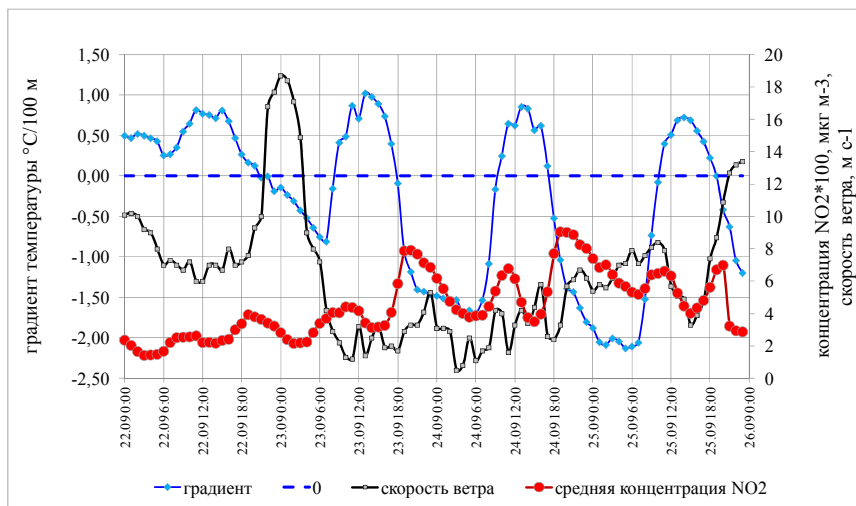


Рис. 3. Скорость ветра на высоте 305 м, градиент температуры в слое 2–305 м по данным измерений на телебашне Останкино, средняя по городу концентрация NO_2 (в эпизоде НМУ 23–25 сентября 2020 г., Москва).

Fig. 3. Wind speed at an altitude of 305 m, temperature gradient in the layer 2-305 m according to measurements at the Ostankino TV tower, the average NO_2 concentration in the city in the episode of UMC on September 23-25, 2020, Moscow.

Ночью 24 сентября на повышенном фоне загрязнения при $\text{МПРЗ} = 1$ уровень городского загрязнения при штиле и температурной инверсии до 6 ч понижался, что определялось незначительным трафиком на дорогах города. Обычный ритм городского транспорта (главного источника загрязнения в Москве) с резким увеличением загруженности дорог с 7 ч обеспечил формирование утреннего пика загрязнения (10 ч) в условиях слабого ветра и устойчивой стратификации. Резкое понижение уровня загрязнения произошло после полудня 24 сентября при $\text{МПРЗ} = 2.3$, величину которого определило увеличение вертикального градиента более $0,6 \text{ }^\circ\text{C}/100\text{м}$. Характерная для НМУ суточная М-образная сигнатура средней городской концентрации NO_2 , PM_{10} и CO повторилась на более высоком фоне загрязнения в следующем цикле НМУ ($\text{МПРЗ} = 1$) – с вечера 24 сентября до 15 ч 25 сентября. Очевидно, высокая чувствительность алгоритма МПРЗ к величине скорости в АПС привела к переоценке условий рассеивания ночью 25 сентября ($\text{МПРЗ} = 3.1$) при наличии мощной приземной инверсии температуры с вертикальным градиентом температуры до $2,2 \text{ }^\circ\text{C}/100\text{м}$, что может стать предметом уточнения критериев $\text{МПРЗ} = 1$. Вместе с тем повышение уровня загрязнения вечером 25 сентября при усилении ветра в АПС частично может быть связано с эффектом «пятницы». После 20 ч при усилении скорости переноса (более 10 м с^{-1}) начался резкий спад уровня загрязнения, достигшего к полуночи фоновых значений (рис. 2а, в).

Не исключено также, что в рассматриваемом эпизоде НМУ при преобладании слабого рассеивания к городскому загрязнению добавились шлейфы дыма от сжигания растительных остатков из пригородов московской агломерации, мелкие частицы которых участвовали в 2–3-кратном превышении фоновых уровней PM_{10} 24–25 сентября (рис. 2б).

Следует отдельно отметить, что в загрязненном воздухе 24–25 сентября вертикальный градиент температуры в нижнем слое атмосферы днем не достигал значения сухоадиабатического, как это наблюдалось в чистом воздухе днем 23 сентября. Зафиксированное усиление термической устойчивости может служить иллюстрацией изменения радиационных процессов в атмосфере при изменении газово-аэрозольного состава городского воздуха – его значительном загрязнении (рис. 3).

Непрерывные измерения концентраций загрязняющих веществ на АСКЗА позволяют получить динамичные по времени и пространству характеристики, проводить их обобщения, соответствующие масштабам прогнозируемого МПРЗ по данным численного прогноза. На сети Росгидромета принята система 3–4-разового измерения концентраций загрязняющих веществ с отсутствием измерений в один из выходных дней, что затрудняет верификацию метода расчета МПРЗ по данным сетевых измерений. Проблемой остается доступность данных мониторинга для выполнения исследовательских задач.

В рамках апробации прогноза МПРЗ в сетевых подразделениях Росгидромета авторам были предоставлены данные измерений концентраций в Курске, Нижнем Новгороде и Казани. Одна из иллюстраций связи МПРЗ с осредненными по городу концентрациями загрязняющих веществ в Курске 18–21 января 2021 г. представлена на рис. 4. Заметим, что в городе контроль загрязнения проводится на четырех постах в 7, 13 и 19 часов. Как видно на рисунке, имеется тесная связь МПРЗ с концентрациями NO_2 . При МПРЗ = 2 (подтипы 2.1, 2.3) уровень NO_2 в течение суток 18 января медленно повышался, хотя и оставался невысоким. При МПРЗ первого типа (МПРЗ = 1) 19 и 20 января концентрация NO_2 увеличилась по сравнению в предыдущим днем почти 2 раза. Интенсивное рассеивание 21 января при МПРЗ > 3 обеспечило возвращение загрязнения на фоновый уровень с характерным для города вечерним слабовыраженным максимумом.

Не очевидной, как для NO_2 , оказалась связь МПРЗ с концентрацией CO по данным измерений концентрации этого вещества в Курске. Но следует понимать, что МПРЗ предназначен для описания предпосылок колебания уровня загрязнения под влиянием мезомасштабных метеорологических условий, способствующих при ослаблении условий рассеивания (МПРЗ = 1) значительному увеличению среднего на городской территории загрязнения (в Москве – не менее чем в 1,5 раза). Для Курска характерным является более высокое по сравнению с другими крупными городами на ЕТР и относительно стабильное содержание CO в приземном

воздухе. В рассматриваемом периоде 18–21 января изменчивость средней городской концентрации CO не превысила 20 %, т. е. чувствительность CO к резким изменениям условий рассеивания в этом городе слабая и, следовательно, использовать данное вещество для верификации МПРЗ не имеет смысла.

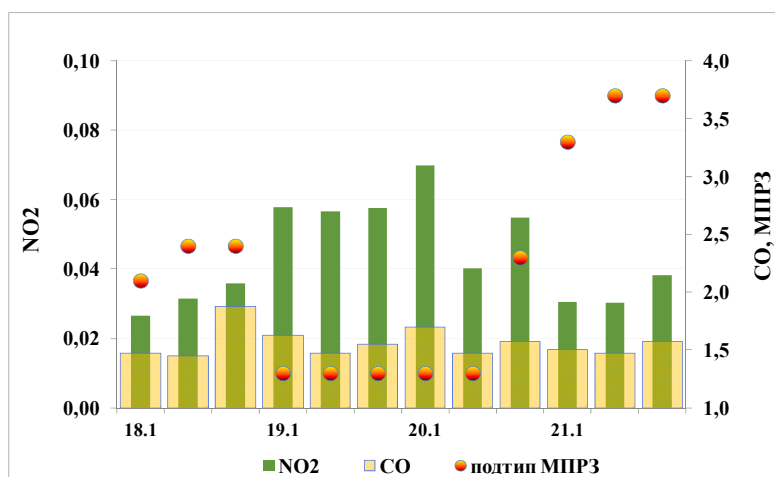


Рис. 4. Средняя по городу концентрация CO, NO₂, подтип МПРЗ. Курск. 18–21 января 2021 г. (в каждые сутки показаны данные в 7, 13 и 19 ч).

Fig. 4. Average in the city concentration of CO, NO₂, a subtype of MIPD. Kursk. January 18-21, 2021 (data showed for each day 7, 13 and 19 hours).

Из-за ограничений размера статьи примеры связей МПРЗ с загрязнением воздуха в других эпизодах и других городах планируется представить в будущих публикациях, подчеркивая при этом сложность установления связей по данным сетевых 3–4-разовых измерений концентраций загрязняющих веществ в сутки.

Вероятностный прогноз МПРЗ

Детерминированный прогноз МПРЗ зависит от ошибок прогнозов данных используемой для расчетов численной модели атмосферы (COSMO-Ru), как следствие несовершенных начальных условий, использования приближенных математических методов решения уравнений внутри модели и т. д. Неопределенность в прогнозе погоды и наиболее вероятный исход прогнозируемого события позволяют оценивать системы ансамблевого прогнозирования, которые сегодня применяются во многих прогностических центрах, в т. ч. в Гидрометцентре России [11]. Некоторые из них (мультимодельные) используют более одной модели внутри ансамбля, другие (мультифизические) – одну и ту же модель,

но с различными комбинациями схем физической параметризации или набором начальных данных [9].

Вероятностный прогноз позволяет специалисту видеть не только преобладающий вариант прогноза, но и предвидеть наиболее вероятные отклонения от этого прогноза. Для сопровождения прогноза МПРЗ информацией о вероятности наступления, в первую очередь, МПРЗ первого типа (НМУ), разработан алгоритм расчета вероятности каждого типа МПРЗ с применением множественного моделирования. В основу разработанного алгоритма положен анализ разброса величин МПРЗ при учете характерных величин ошибок каждого входящего в модель МПРЗ параметра (V_h, S_h, Pr, Adv) и определение вероятности наступления каждого типа МПРЗ ($P_{МПРЗ 1, 2, 3}$):

$$P_{МПРЗ 1, 2, 3} = m/n, \quad (2)$$

где m – число случаев, благоприятных осуществлению МПРЗ = 1, МПРЗ = 2, МПРЗ = 3; n – число всех равновозможных величин МПРЗ.

Разброс величин МПРЗ определялся исходя из допуска ошибок прогноза для скорости ветра ($V_h = \pm 1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$) и стратификации ($S_h = \pm 0,1 \text{ К}/100\text{м}$). Иллюстрацией реализованного алгоритма вероятностного прогноза МПРЗ могут служить приведенные в табл. 3 данные, где для каждого внутрисуточного интервала указана вероятность (%) каждого типа МПРЗ. Заливкой выделен наиболее вероятный прогноз типа МПРЗ, в т. ч. розовым цветом выделены периоды с преобладающими НМУ (МПРЗ = 1).




На основе прогноза вероятности типа МПРЗ можно получить экспресс-оценку общей ситуации по условиям рассеивания загрязняющих веществ и возможного формирования НМУ в регионе и отдельных городах. Покажем это на данных вероятностного прогноза на 5–6 августа 2021 г. (табл. 3). Правая, в основном окрашенная зеленым часть таблицы указывает на очевидное улучшение условий рассеивания утром 6 августа во всем указанном регионе – от Костромы до Курска. Слабое рассеивание с высокой вероятностью (70–100 %) будет преобладать уже вечером 5 августа на большей территории, за исключением северо-западных районов (Тверь – Ржев), а ночью НМУ сохранятся только в Смоленской, Тамбовской, Тульской и Липецкой областях. Следовательно, на большей части региона с высокой вероятностью кратковременные НМУ будут наблюдаться вечером и ночью. Наиболее неблагоприятная ситуация ожидается в Тульской области, где не исключена вероятность НМУ и в утренние часы.

С нашей точки зрения динамическая интерпретация вероятностного прогноза, т. е. анализ его временной динамики, может быть существенной помощью специалистам-практикам при принятии решения о составлении предупреждений о НМУ для предприятий и необходимости сокращения выбросов.

Таблица 3. Вероятностный прогноз МПРЗ в городах ЦФО на период с 11 ч 5.08 до 23 ч 6.08.21

Table 3. Probabilistic forecast of MIPD for the cities of the Central Russia for the period from 11 h 5.08.2021 to 23 h 6.08.2021

Вероятностный прогноз типа МПРЗ на 5.08.2021																		
Станции	Периоды прогноза																	
	день			вечер			ночь			утро			день			вечер		
	11-17 ч			18-23 ч			0-6 ч			7-10 ч			11-17 ч			18-23 ч		
	Тип МПРЗ																	
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Кострома	0	100	0	73	17	10	6	0	94	0	0	100	0	0	100	0	0	100
Волгореченск	0	100	0	38	17	45	14	0	86	0	0	100	0	0	100	0	0	100
Шарья	0	79	21	67	28	5	100	0	0	0	35	65	0	96	4	50	17	33
Курск	0	21	79	83	12	5	47	0	53	0	0	100	0	0	100	0	0	100
Липецк	0	100	0	83	17	0	86	0	14	8	0	92	0	0	100	0	0	100
Орел	0	27	73	85	0	15	44	0	56	0	0	100	0	0	100	0	0	100
Рязань	0	100	0	83	17	0	63	0	37	43	0	57	0	47	53	0	0	100
Новомичуринск	0	100	0	78	17	5	49	0	51	43	0	57	0	4	96	0	0	100
Касимов	14	86	0	100	0	0	96	0	4	75	0	25	0	14	86	33	0	67
Михайлов	0	100	0	12	22	66	53	0	47	0	0	100	0	29	71	0	0	100
Смоленск	0	0	100	67	33	0	86	0	14	0	0	100	0	0	100	0	0	100
Вязьма	0	37	63	0	28	72	100	0	0	25	0	75	0	0	100	17	0	83
Тамбов	0	100	0	83	17	0	61	0	39	18	0	82	0	0	100	0	0	100
Тверь	0	71	29	0	22	78	43	0	57	3	97	0	0	33	67	0	0	100
Вышний Волочек	0	86	14	0	17	83	0	10	90	0	92	8	0	34	66	0	0	100
Ржев	0	20	80	0	0	100	43	4	53	25	18	57	0	0	100	0	0	100
Тула	14	82	4	83	17	0	76	0	24	50	0	50	14	49	37	5	3	92
Новомосковск	0	100	0	83	12	5	53	0	47	0	0	100	14	14	72	0	0	100
Узловая	0	100	0	83	17	0	67	0	33	50	0	50	0	10	90	0	0	100
Ясная Поляна	14	82	4	100	0	0	81	0	19	92	0	8	14	34	52	12	0	88
Ярославль	0	100	0	17	17	66	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100
Переславль-Зал.	0	100	0	66	17	17	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100
Рыбинск	0	96	4	0	23	77	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100
Тутаев	0	100	0	50	28	22	14	0	86	0	0	100	0	0	100	0	0	100

	слабое рассеивание
	умеренное рассеивание
	интенсивное рассеивание

Заключение

Выполняемые в Гидрометцентре России исследования направлены на информационное обеспечение специалистов, выполняющих прогнозирование загрязнения воздуха и НМУ, метеорологическими данными и параметрами, рассчитанными по результатам конфигурации COSMO-Ru7 (или COSMO-Ru6,6) с временным разрешением 1 час с заблаговременностью до 72 часов. Реализована автоматизированная технология рассылки прогностической информации в сетевые подразделения Росгидромета.

Разработанный метод прогноза МПРЗ решением ЦМКП Росгидромета от 1 декабря 2017 г. рекомендован для использования в оперативной практике прогностических подразделений Росгидромета в качестве вспомогательного при прогнозировании загрязнения воздуха и НМУ. Проверка оперативных прогнозов в 17 городах (семь УГМС) на Европейской территории России стимулировала усовершенствование алгоритма расчета МПРЗ в части минимизации ошибок прогноза входящих метеорологических параметров.

Метод расчета МПРЗ верифицирован (2020–2021 гг.) с использованием данных автоматизированных измерений концентраций и сетевых 3–4-разовых измерений в Москве и некоторых крупных городах ЕТР. В эпизодах НМУ подтверждена связь идентифицируемого по МПРЗ слабого рассеивания с синхронизированным повышением уровня первичных загрязнений на городской территории.

Разработан и реализован алгоритм вероятностного прогноза МПРЗ в пунктах прогнозирования НМУ, позволяющий учитывать неопределенность прогноза при составлении предупреждений о НМУ и продолжительность неблагоприятных для очищения воздуха условий.

В Гидрометцентре России в ближайшем будущем будет проведен переход на расчеты с использованием прогностических данных COSMO-Ru6,6 на всей территории страны, для европейской территории возможны расчеты с использованием данных COSMO-Ru2,2.

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

Список литературы

1. Вильфанд Р.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Звягинцев А.М., Нахаев М.И., Захарова П.В., Лапченко В.А. Мониторинг и прогнозирование качества воздуха в Московском регионе // Биосфера. 2014. Т. 6, № 4. С. 339-351. DOI:<http://dx.doi.org/10.24855/biosfera.v6i4.18>

2. Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Карпов А.В. и др. Недельный цикл загрязнения воздуха в г. Москве: количественные характеристики и уточнение методики статистического прогноза концентраций примесей // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23, № 9. С. 784-792.

3. Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Трифанова А.В. и др. О содержании малых газовых примесей в приземном слое атмосферы над Москвой // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51, № 1. С. 39-51.

4. Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Тарасова О.А., Шалыгина И.Ю. Изменчивость концентраций основных загрязнителей воздуха в Лондоне // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 5. С. 424-434.

5. Кузнецова И.Н., Глазкова А.А., Шалыгина И.Ю. и др. Сезонная и суточная изменчивость концентраций взвешенных частиц в приземном воздухе жилых районов Москвы // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. С. 473-482.

6. Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Ткачева Ю.В., Ривин Г.С., Кирсанов А.А., Борисов Д.В., Лезина Е.А. Система прогнозирования качества воздуха на основе химических транспортных моделей // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 203-218.

7. РД 52.04.306-92. Охрана природы. Атмосфера. Руководство по прогнозу загрязнения воздуха.

8. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Шатунова М.В., Чубарова Н.Е., Алферов Д.Ю., Варенцов М.И., Захарченко Д.И., Копейкин В.В., Никитин М.А., Полохов А.А., Ревокатова А.П., Татаринovich Е.В., Чурулин Е.В. Система краткосрочного численного прогноза высокой детализации COSMO-Ru, ее развитие и приложения // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 27-53.

9. Руководящие указания по системам ансамблевого прогнозирования и прогнозированию // ВМО-№ 1091. Женева: ВМО, 2012. 37 p.

10. Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Коновалов И.Б., Березин Е.В. суточный ход загрязняющих воздух веществ по измерениям и расчетам химической транспортной модели // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2016. № 2 (360). С. 149-167.

11. Astakhova E., Alferov D., Alferov Yu., Bundel A. Ensemble approach to weather forecasting // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol. 1740. P. 012070. DOI:10.1088/1742-6596/1740/1/012070

12. Bodor Z., Bodor K., Keresztesi Á., Szép R. Major air pollutants seasonal variation analysis and long-range transport of PM₁₀ in an urban environment with specific climate condition in Transylvania (Romania) // Environmental Science and Pollution Research. 2020. Vol. 27. P. 38181-38199. Doi.org/10.1007/s11356-020-09838-2

13. Cichowicz R., Stelęgowski A. Average Hourly Concentrations of Air Contaminants in Selected Urban, Town, and Rural Sites // Arch Environ Contam Toxicol. 2019. Vol. 77, no. 2. P. 197-213. DOI:10.1007/s00244-019-00627-8. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6606669/>

14. Cichowicz R., Wielgosiński G., Fetter W. Dispersion of atmospheric air pollution in summer and winter season // Environ Monit Assess. 2017. Vol. 189. P. 605. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6319-2>

15. Habulan M., Đurin B., Ptiček A., Sakač N. Analysis of the Particulate Matter Pollution in the Urban Areas of Croatia // Environ. Sci. Proc. 2021. Vol. 4, no. 1. P. 9. <https://doi.org/10.3390/ecas2020-08145>.

16. Toth I., Hercog P., Peternel R., Vojniković B. Seasonal, daily and intradiurnal variation of PM₁₀, NO₂, NO and O₃ in residential part of Zagreb, Croatia // Collegium antropologicum. 2011. Vol. 35. P. 25-30.

References

1. Vil'fand R.M., Kuznetsova I.N., Shalygina I.Yu., Zvyagintsev A.M., Nakhaev M.I., Zakharova P.V., Lapchenko V.A. Air quality monitoring prognosis in Moscow region. *Biosfera*, 2014, vol. 6, no. 4, pp. 339-351 [in Russ.].

2. Gorchakov G.I., Semoutnikova E.G., Karpov A.V., Kolesnikova A.B., Baykova E.S., Zadorozhnaya O.S. Air pollution week-long cycle in Moscow: of refinement quantitative parameters and statistical forecasting of impurity concentration. *Optika Atmosfery i Okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 2010, vol. 23, no. 9, pp. 784-792 [in Russ.].

3. Elansky N.F., Belikov I.B., Skorokhod A.I., Lokoshchenko M.A., Trifanova A.V. On contents of trace in the atmospheric surface layer over Moscow. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, vol. 51, no. 1, pp. 30-41. DOI: 10.1134/S000143381501003X.

4. Zvyagintev A.M., Kuznetsova I.N., Shalygina I.Y., Tarasova O.A. Variations in the concentrations of main air pollutants in London. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2014, vol. 27, no. 5, pp. 417-427. DOI: 10.1134/S1024856014050170.

5. Kuznetsova I.N., Glazkova A.A., Shalygina I.Yu., Nakhaev M.I., Arkhangel'skaya A.A., Zvyagintsev A.M., Semutnikova E.G., Zakharova P.V., Lezina E.A. Seasonal and diurnal variability of particulate matter PM 10 in surface air of Moscow habitable districts. *Optika Atmosfery i Okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 2014, vol. 27, no. 6, pp. 473-482 [in Russ.].

6. Kusnetsova I.N., Shalygina I.U., Nahaev M.I., Tkacheva U.V., Rivin G.S., Kirsanov A.A., Borisov D.V., Lezina E.A. Air quality forecasting system based on chemical transport models. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2019, vol. 374, no. 4, pp. 203-218 [in Russ.].

7. RD 52.04.306-92. Okhrana prirody. Atmosfera. Rukovodstvo po prognozu zagryazneniya vozdukha [in Russ.].

8. 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.].

9. Guidelines on Ensemble Prediction Systems and Forecasting. *WMO-No. 1091*. Geneva, WMO, 2012, 37 p.

10. Shalygina I.Y., Kuznetsova I.N., Nahaev M.I., Konovalov I.B., Berezin E.V. The comparison of diurnal variations of air pollutants using measurements and calculations of a chemical transport model. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2016, vol. 360, no. 2, pp. 149-167 [in Russ.].

11. Astakhova E., Alferov D., Alferov Yu., Bundel A. Ensemble approach to weather forecasting. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1740, pp. 012070. DOI:10.1088/1742-6596/1740/1/012070.

12. Bodor Z., Bodor K., Keresztesi Á., Szép R. Major air pollutants seasonal variation analysis and long-range transport of PM₁₀ in an urban environment with specific climate condition in Transylvania (Romania). *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, pp. 38181-38199. DOI: 10.1007/s11356-020-09838-2.

13. Cichowicz R., Steleǳowski A. Average Hourly Concentrations of Air Contaminants in Selected Urban, Town, and Rural Sites. *Arch Environ Contam Toxicol.*, 2019, vol. 77, no. 2, pp. 197-213. DOI: 10.1007/s00244-019-00627-8.

14. Cichowicz R., Wielgosiński G., Fetter W. Dispersion of atmospheric air pollution in summer and winter season. *Environ Monit Assess.*, 2017, vol. 189, p. 605. DOI: 10.1007/s10661-017-6319-2.

15. Habulan M., Đurin B., Ptiček A., Sakač N. Analysis of the Particulate Matter Pollution in the Urban Areas of Croatia. *Environ. Sci. Proc.*, 2021, vol. 4, no. 1, p. 9. DOI: 10.3390/ecas2020-08145.

16. Toth I., Hercog P., Peternel R., Vojniković B. Seasonal, daily and intradiurnal variation of PM₁₀, NO₂, NO and O₃ in residential part of Zagreb, Croatia. *Collegium antropologicum*, 2011, vol. 35, pp. 25-30.

Поступила 25.08.2021; одобрена после рецензирования 14.09.2021;
принята в печать 28.09.2021.

Submitted 25.08.2021; approved after reviewing 14.09.2021;
accepted for publication 28.09.2021.