

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-2-64-84>

УДК 504.064.3:504.3.054

Обновленная система прогнозирования концентраций загрязняющих веществ в московском регионе на основе химической транспортной модели CHIMERE-2023

Ю.В. Ткачева, И.Н. Кузнецова

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

На вычислительной платформе Cray XC40-LC Главного вычислительного центра Росгидромета актуализирована одна из последних версий химической транспортной модели CHIMERE-2023 с обновленным интерфейсом. С учетом того, что ХТМ CHIMERE-2023 разрабатывалась и настраивалась для использования в странах Евросоюза, установка обновленной версии сопровождалась серией численных экспериментов по изучению чувствительности откликов модели в ответ на изменения региональных выбросов, подбором параметров сезонного и суточного распределения эмиссий используемого кадастра ЕМЕП-2021. Результаты экспериментального тестирования обновленной технологии указывают в целом на удовлетворительное качество прогнозирования приоритетных загрязняющих веществ с учетом того, что период проверки (сентябрь 2024 года) был аномальным как по погодным условиям (средняя месячная температура на 4 °С выше нормы), так и по загрязнению воздуха частицами РМ₁₀ из-за частого влияния дальнего переноса и из-за нехарактерного приземного озона, превысившего норму на 15–18 %.

Ключевые слова: загрязняющие вещества, химическая транспортная модель CHIMERE, эмиссии ЕМЕП, COSMO-Ru2ETR, верификация

An updated system for forecasting pollutant concentrations in the Moscow region based on the CHIMERE-2023 chemistry-transport model

J.V. Tkacheva, I.N. Kuznetsova

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

One of the latest versions of the CHIMERE-2023 chemistry-transport model with an updated interface is actualized on the Roshydromet CRAY XC40-LC computing platform. Given that the CHIMERE-2023 model was developed and configured for use in the EU countries, the installation of the updated version for the Moscow region was accompanied by the series of numerical experiments to study the sensitivity of the model responses to changes in regional emissions and by the selection of parameters for the seasonal and daily emission distribution of the EMEP-2021 inventory used. The results of the experimental testing of the updated technology indicate generally satisfactory quality of forecasting priority pollutants, taking into account that the testing period (September 2024) was abnormal both in terms of weather conditions (the monthly mean temperature was 4 °C above normal)

and in terms of air pollution with PM₁₀ particles due to the frequent influence of long-range transport, as well as due to uncharacteristic ground-level ozone, which exceeded the normal by 15–18%.

Keywords: pollutants, CHIMERE chemistry-transport model, EMEP emissions, COSMO-Ru2ETR, verification

Введение

Использование химических транспортных моделей – широко применяемая зарубежная практика прогнозирования качества воздуха, что иллюстрируется публикациями ВМО, в частности [14]. Одним из примеров такой практики может служить европейская Служба мониторинга атмосферы Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), которая предоставляет, в частности, информацию о загрязнении воздуха по всему миру (<https://atmosphere.copernicus.eu/cams-air>). Ежедневно CAMS рассчитывает четырехсуточные прогнозы по пяти основным загрязнителям воздуха, регулируемым стандартами качества воздуха Европейского союза и Всемирной организации здравоохранения: диоксид азота (NO₂), озон (O₃), крупные твердые частицы (PM₁₀), мелкие твердые частицы (PM_{2,5}) и диоксид серы (SO₂), а также для некоторых других загрязняющих веществ, в т. ч. формальдегида, а также пылицы и аэрозольных трассеров в Европе (<https://atmosphere.copernicus.eu/european-air-quality-forecast-plots>). Для оценки опасности воздушного загрязнения в CAMS прогнозируется индекс качества воздуха (AQI) по всей Европе на 24 часа вперед, при этом можно получить информацию о AQI в любой час из предыдущих 48 часов.

Расчеты прогностических концентраций загрязняющих веществ производятся как по отдельным ХТМ: CHIMERE, DENM, EMEP, EURAD-IM, GEM-AQ, LOTOS-EUROS, MATCH, MINNI, MOSAGE, MONARCH, SILAM, так и на основе региональной ансамблевой модели CAMS. Созданная большими коллективами европейских разработчиков система прогнозирования качества воздуха CAMS служит прообразом разрабатываемой в Гидрометцентре России в последние годы технологии прогнозирования.

В число используемых в CAMS моделей входит ХТМ CHIMERE, которая с 2013 года является моделью открытого доступа [18]. ХТМ CHIMERE версии 2013 года (CHIMERE-2013), реализованная в оперативном режиме в Гидрометцентре России, описана подробно в [6, 7]. На базе CHIMERE-2013 были проведены эксперименты с пространственной коррекцией эмиссий загрязняющих веществ кадастра ЕМЕП (European Monitoring and Evaluation Programme) 2013 года (https://www.emep.int/emep_overview.html), коррекцией сезонного и внутрисуточного распределения суммарных выбросов в атмосферу загрязняющих веществ, а также тестирования вариантов с горизонтальным разрешением 11, 7 и 2 км путем сравнения с данными наблюдений на автоматических станциях контроля загрязнения атмосферы (АКЗА) в Москве (<https://mosecom.mos.ru/air-quality/>). Оценки прогнозов загрязняющих веществ позволили установить

характерные отклонения модельных расчетов от измеренных концентраций различных загрязняющих веществ. [6]. В последнее время для пост-процессинга был применен метод машинного обучения, показавший целесообразность применения такого подхода для повышения успешности прогнозов загрязнений (PM_{10} и O_3) в периоды неблагоприятных метеорологических условий [1, 2].

В 2023 году разработчиками XTM CHIMERE была представлена новая версия модели CHIMERE-2023 с коренным изменением вычислительной структуры, улучшенным физическим и химическим наполнением, а также новым препроцессором, позволяющим использовать входные эмиссии загрязняющих веществ из разных баз данных [17].

Современная вычислительная платформа Росгидромета и публикация актуализированной XTM CHIMERE-2023 с эмиссиями ЕМЕР за 2021 год (ЕМЕР-2021) позволили нам реализовать обновленную технологию прогнозирования на суперкомпьютере CRAY XC40-LC.

Ниже кратко описываются новые возможности CHIMERE-2023, отличия от предыдущих версий XTM, особенности баз данных эмиссий, а также полученные результаты тестирования обновленной технологии.

Новизна актуализированной XTM CHIMERE-2023

Модель CHIMERE-2023 находится в общем доступе, подробно описана в документациях на сайте [<https://www.lmd.polytechnique.fr>] и опубликованных статьях разработчиков модели [15, 17]. XTM CHIMERE-2023 создавалась разработчиками на базе версии модели CHIMERE-2013 [16, 18, 19]. К числу основных усовершенствований относятся:

- численная реализация модели в декартовой системе координат;
- реализация вариантов счета прогнозов: *online* – с использованием в качестве метеорологической модели только WRF (Weather Research and Forecasting) с учетом и без учета обратной связи между моделями, *offline* – с использованием готовых прогнозов имеющихся у пользователей метеорологических моделей (WRF или др.);
 - введение новых схем горизонтального и вертикального переноса загрязняющих веществ;
 - усовершенствование учета процессов подсеточного масштаба;
 - возможность выбора механизма химических процессов SAPRC, широко используемого в современных XTM, или MELCHIOR;
 - реализация обновленного блока препроцессора расчета входных эмиссий загрязняющих веществ с учетом измененной структуры записи данных в актуализированной базе ЕМЕР;
 - возможность выбора БД для входных эмиссий (ЕМЕР, CAMS и др.);
 - усовершенствование файловой структуры для удобства анализа входных и прогностических данных.

Горизонтальная сеточная структура аналогична структуре гидродинамической модели WRF, так как в своем оригинальном варианте WRF является основной метеорологической моделью для CHIMERE-2023. Расчеты ХТМ с использованием тандема CHIMERE – WRF имеет ряд преимуществ, поскольку не требует интерполяции входных метеорологических данных при переходе к сетке химической модели, позволяет учесть обратную связь прогнозируемых величин в обеих моделях, подобрать в обеих моделях параметризацию, наилучшим образом описывающую физические процессы для выбранной области прогноза. Но одновременно с преимуществами использования модели WRF стоит отметить и недостатки. Для оперативного счета требуются мощные вычислительные и людские ресурсы. Если мощный PC или станцию для региональных прогнозов можно приобрести, то профессионалов, имеющих опыт, знания в различных областях метеорологии для настройки модели для своих географических районов, найти сложнее.

ХТМ CHIMERE-2023

Актуализированная версия химико-транспортной модели CHIMERE, вышедшая в 2023 году, предназначена для численного прогнозирования концентраций загрязняющих веществ с учетом описания химических и физических процессов [17]. Предусмотренный разработчиками модели CHIMERE-2023 вариант *offline* включения в химическую модель “готовой” метеорологической прогностической продукции численных моделей атмосферы был использован нами для реализации обновленной технологии прогнозирования качества воздуха в московском регионе.

В Гидрометцентре России считаются прогнозы по нескольким конфигурациям системы краткосрочного прогнозирования COSMO-Ru с разным горизонтальным и вертикальным разрешением и областями прогноза. Поскольку эти модификации модели создавались для российских территорий, то прогнозы рассчитываются с учетом физических процессов, характерных для данных регионов. Для расчетов CHIMERE-2023 нами была выбрана конфигурация COSMO-Ru2ETR. Следует отметить, что совместно с используемой конфигурацией модели COSMO-Ru в Гидрометцентре России считается химическая модель COSMO-ART [3, 11], прогнозы которой важны для сравнения и комплексирования с CHIMERE-2023.

Структура технологии прогнозирования концентраций загрязняющих веществ на основе ХТМ CHIMERE-2023 представлена схематично в виде составляющих блоков на рис. 1.

ХТМ CHIMERE-2023 реализована на суперкомпьютере Cray XC40-LC Главного вычислительного центра Росгидромета. Предварительно были установлены указанные в документации и отсутствовавшие на Cray XC40-LC системные библиотеки. Время счета ХТМ CHIMERE-2023 прогноза концентраций загрязняющих веществ на 2 суток для московского региона составляет около 1 часа.

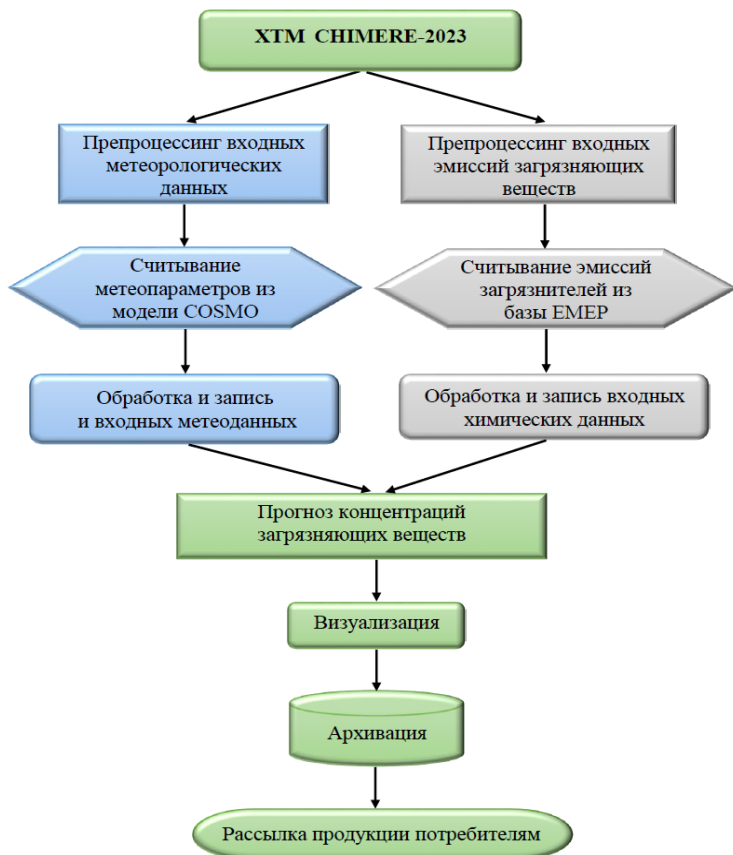


Рис. 1. Схема технологии прогнозирования концентраций загрязняющих веществ на базе XTM CHIMERE-2023.

Fig. 1. Scheme of pollutant concentration forecasting technology based on CHIMERE-2023.

XTM CHIMERE-2023 имеет горизонтальную вычислительную сетку в декартовой системе координат с заданным пользователем горизонтальным разрешением и ориентированной относительно координат центрального узла областью прогноза. Горизонтальное разрешение равно 2 км по обеим осям, область прогноза захватывает территорию Москвы и небольшие приграничные районы. Поскольку применяется нерегулярная по широте и долготам сетка, границы области счета заданы по долготам (36.5° и 38.3° в. д.) и широтам (54.9° и 56.2° с. ш.), число узлов по осям x и y равно 61 и 75 соответственно, число вертикальных уровней составляет 20, первый уровень модели находится на 998 гПа, а верхняя граница на 300 гПа.

Высокое горизонтальное разрешение и улучшение вертикального разрешения, при котором толщина первого слоя модели уменьшена до 2 гПа, позволяют точнее описывать перенос во всем пограничном слое. На рис. 2а

показана расчетная область модели с границами административных округов Москвы и типовая принадлежность входящих в модельные ячейки АСКЗА, а на рис. 2б – сеточное разрешение баз ЕМЕР, используемых CHIMERE-2023 (синим) и CHIMERE-2013 (красным).

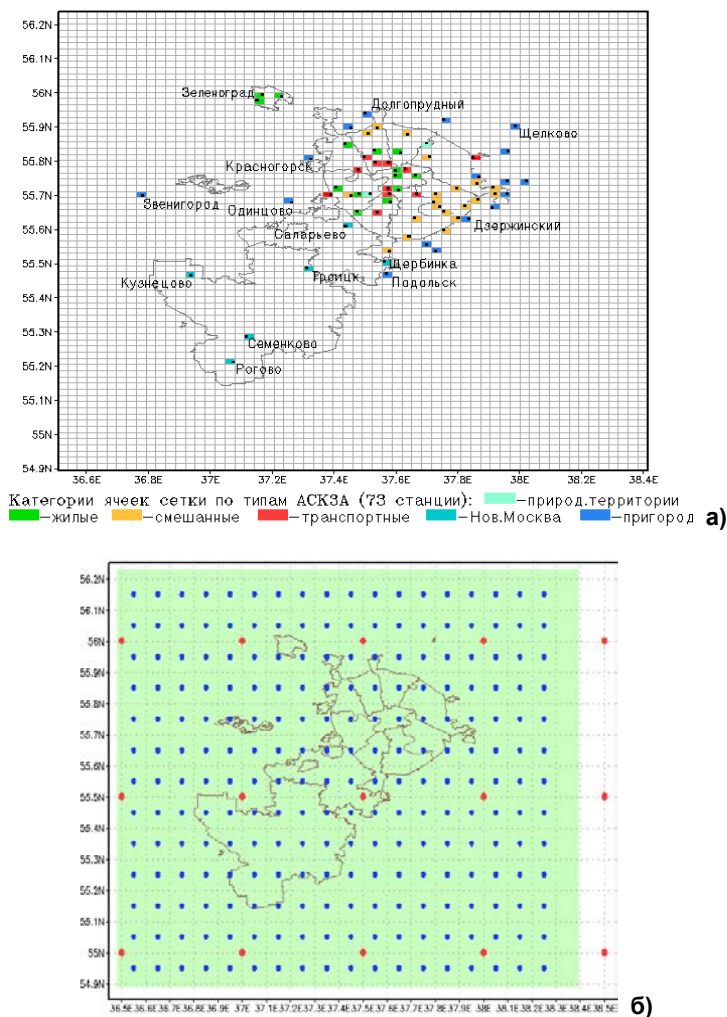


Рис. 2. Сеточная область прогноза XTM CHIMERE-2023 с границами административных округов г. Москвы и категориями ячеек сетки по типу входящих в них АСКЗА (обозначены черными точками) (а); сеточная область базы ЕМЕР, используемой для CHIMERE-2023 (синим) и для CHIMERE-2013 (красным) (б).

Fig. 2. Grid area of CHIMERE-2023 forecast with boundaries of Moscow administrative districts and categories of grid cells by the type of AAPMS (automatic air pollution monitoring stations) included in them (marked with black dots) (a); grid area of the EMEP database used for CHIMERE-2023 (blue) and for CHIMERE-2013 (red) (b).

Преобработка входных метеорологических данных

Для расчетов CHIMERE-2023 установлен обязательный перечень входных метеопараметров (табл. 1) и список необязательных параметров (вертикальная скорость, высота пограничного слоя). При отсутствии последних во входном потоке, они вычисляются в ХТМ по заданному алгоритму.

Таблица 1. Входные метеорологические параметры COSMO-Ru2ETR, передаваемые в CHIMERE-2023

Table 1. COSMO-Ru2ETR input meteorological parameters transmitted to CHIMERE-2023

Название	Единица измерения
2D	
Долгота узла сетки	град
Широта узла сетки	град
Приземная температура	К
Зональная составляющая приземного ветра	м·с ⁻¹
Меридиональная составляющая приземного ветра	м·с ⁻¹
Приземная удельная влажность	0–1
Приземный дефицит точки росы	К
Крупномасштабные осадки	кг·м ⁻² ·ч ⁻¹
Конвективные осадки	кг·м ⁻² ·ч ⁻¹
Коротковолновая радиация у земной поверхности	Вт·м ⁻²
Длинноволновая радиация у земной поверхности	Вт·м ⁻²
Приземный явный поток тепла	Вт·м ⁻²
Приземный скрытый поток тепла	Вт·м ⁻²
Облачность среднего яруса	-
Облачность нижнего яруса	-
Облачность верхнего яруса	-
Высота пограничного слоя	м
Высота снега	см
Водный эквивалент высоты снега	м
Приземное давление	Па
3D	
Температура	К
Удельная влажность	кг·кг ⁻¹
Удельная водность	кг·кг ⁻¹
Удельное содержание льда	кг·кг ⁻¹
Удельная масса дождевых капель	кг·кг ⁻¹
Удельная масса снега	кг·кг ⁻¹
Давление	Па
Высота половинных уровней	м
Вертикальная скорость	м·с ⁻¹
Зональная составляющая ветра	м·с ⁻¹
Меридиональная составляющая ветра	м·с ⁻¹
Температура слоев почвы	К
Влажность слоев почвы	м ³ ·м ⁻³

В CHIMERE-2023 передаются все перечисленные метеорологические параметры из модели COSMO-Ru2ETR, при этом предварительно проводится поэтапная обработка данных, включающая приведение в соответствие единиц измерения входных полей с принятыми в модели CHIMERE-2023.

Интерполяция данных из сетки COSMO-Ru2ETR на сетку CHIMERE-2023 осуществляется методом билинейной интерполяции с весовыми коэффициентами. Поворот векторных полей при смене систем координат выполняется с помощью стандартной процедуры преобразования систем координат, которая поставляется вместе с документацией к модели COSMO-Ru.

Для пересчета температуры и влажности слоев почвы, имеющих в COSMO-Ru2ETR, на уровни CHIMERE-2023 (табл. 2) применяется линейная интерполяция.

Таблица 2. Уровни почвы в COSMO-Ru2ETR и принятых в CHIMERE-2023
Table 2. Soil levels in the COSMO-Ru2ETR and the CHIMERE-2023

Номера слоев почвы	COSMO-Ru2ETR	CHIMERE-2023
	Нижние уровни слоев	
1	1	7
2	2	28
3	6	100
4	18	
5	54	
6	162	

Интерполяция метеорологических данных, записанных с дискретностью 1 час на каждый временной шаг, между двумя последовательными часами химической модели производится методом линейной интерполяции. Файл метеорологических данных записывается для горизонтальной сетки CHIMERE-2023, но с вертикальным разрешением модели COSMO-Ru2ETR.

Переход на вертикальную сетку модели CHIMERE производится внутри самой химической модели с применением встроенных процедур интерполяции, поскольку вертикальное разрешение метеорологической (COSMO-Ru2ETR) и химической моделей разное. При этом необходимое требование – все трехмерные поля должны быть записаны на половинных уровнях метеорологической модели. Подробное описание разных конфигураций модели COSMO-Ru дано в [9, 10], здесь можно отметить лишь то, что в конфигурации модели COSMO-Ru2ETR применена повернутая сферическая система координат с заданными параметрами шагов сетки, координат области расчета и координат модельного северного полюса.

Преобработка эмиссий загрязняющих веществ

В качестве входных данных о выбросах используются данные кадастра ЕМЕП за 2021 год, представленные CEIP (Center on Emission Inventories and Projections), географически привязанные к горизонтальной сетке с разрешением $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ и классифицированные в соответствии с 15 секторами GNFR (*Gridded Nomenclature For Reporting*) загрязнителей [8]. На рис. 26 показана сетка ЕМЕП-2021 и модельная сетка ЕМЕП-2013 с разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, используемая для расчетов CHIMERE-2013. Значительно увеличенное разрешение ЕМЕП-2021 позволяет более точно распределять выбросы по территории московского региона.

Заметим, данные ЕМЕП-2021 рассчитаны по информации о выбросах загрязняющих веществ в 2019 г., поскольку из-за длительного времени сбора информации и ее обработки представленные на модельной сетке объемы эмиссий становятся общедоступными с двухгодичным запаздыванием. На сайте ЕМЕП данные с выбросами 2021 г. имеются, но обработанные по информации о выбросах 2020 г. (во время пандемии COVID), в настоящее время они осознанно не используются для решения задач прогнозирования концентраций загрязняющих веществ в крупном мегаполисе Москва.

Набор данных ЕМЕП-2021 включает выбросы оксида углерода (CO), оксидов азота (NO_x), аммиака (NH_3), неметановых летучих соединений (NMVOC), диоксида серы (SO_2) и твердых частиц ($\text{PM}_{2.5}$ и грубых $\text{PM}_{\text{coarse}}$, равных разности PM_{10} и $\text{PM}_{2.5}$).

Блок препроцессора emiSURF2023 в ХТМ CHIMERE-2023 обеспечивает выполнение следующих задач: проецирование годовых эмиссий из базы ЕМЕП на сетку CHIMERE-2023, преобразование годовых сумм в почасовые потоки путем применения ежемесячных, еженедельных и почасовых профилей, преобразование данных из исходного набора данных в модельные виды.

Преобразованные эмиссии загрязняющих веществ распределяются по сезонам, дням недели для заданного месяца с учетом временного, суточного хода загрязнителей, принятого в ХТМ для Российской Федерации. Для распределения годовых эмиссий по месяцам и дням недели применяются коэффициенты, различающиеся для городской и пригородной территорий. Для распределения эмиссий в суточном ходе применяются почасовые коэффициенты с учетом дня недели (рис. 3).

Выбросы оксидов азота (NO_x) для всех секторов деятельности, кроме автомобильного транспорта, распределяются следующим образом: NO 95,0 %, NO_2 24,5 %, HONO 0,5 %. Для автомобильного транспорта: NO 90,0 %, NO_2 8,2 %, HONO 0,8 %. Выбросы оксидов серы (SO_x) распределяются для всех секторов деятельности в соотношении: 99 % SO_2 , 1 % H_2SO_4 . Пользователь может задавать собственную дифференциацию потоков выбросов по секторам деятельности в соответствии с номенклатурой GNFR, а также включать несколько входных баз данных о выбросах (ЕМЕП, CAMS и др.).

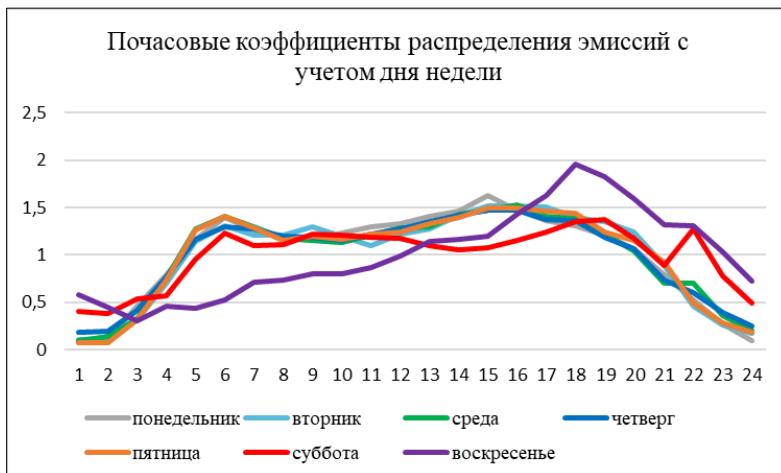


Рис. 3. Почасовые коэффициенты распределения эмиссий с учетом дня недели.

Fig. 3. Hourly emission distribution coefficients taking into account the day of the week.

В процессе обработки выполняется расчет сдвига во времени для синхронизации местного времени необработанных данных с выбросами в универсальном времени (UTC), необходимыми для CHIMERE-2023.

Для пространственного распределения выбросов предлагается использовать набор таких данных: плотность населения, дорожная карта, землепользование и выбросы аэрозолей от сжигания древесины в жилом секторе. Включенные в работу препроцессинга прокси-файлы, поставляемые вместе с CHIMERE-2023, для транспорта, плотности населения, землепользования, распределения городских территорий и др. определяют схему распределения выбросов по прогностической области расчета. Но только карта землепользования является обязательным входом, другие прокси-файлы используются только для секторов GNFR 3 (для жилых районов) и 6 (для транспортных районов). На рис. 4 представлена карта дорожного движения прокси-файлов для транспорта, плотности населения и городской застройки для московского региона.

Начальные и граничные условия берутся из климатологических данных глобальных моделей: LMDz-INCA3 (Laboratoire de Météorologie Dynamique (zoomed) coupled with INteraction with Chemistry and Aerosols) – для всех газообразных и твердых частиц, кроме минеральной пыли (эти данные обновляются ежегодно), для минеральной пыли – из базы данных GOCART5 (Goddard Chemistry Aerosol Radiation and Transport).

Потоки биогенных выбросов рассчитываются с использованием данных модели MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) и базы данных MOD – обработанных спутниковых данных MODIS LAI (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, NASA) растительного

покрова с индексом площади листьев (LAI), определяемой как половина общей площади зеленых листьев на единицу горизонтальной поверхности с временным разрешением 8 дней.

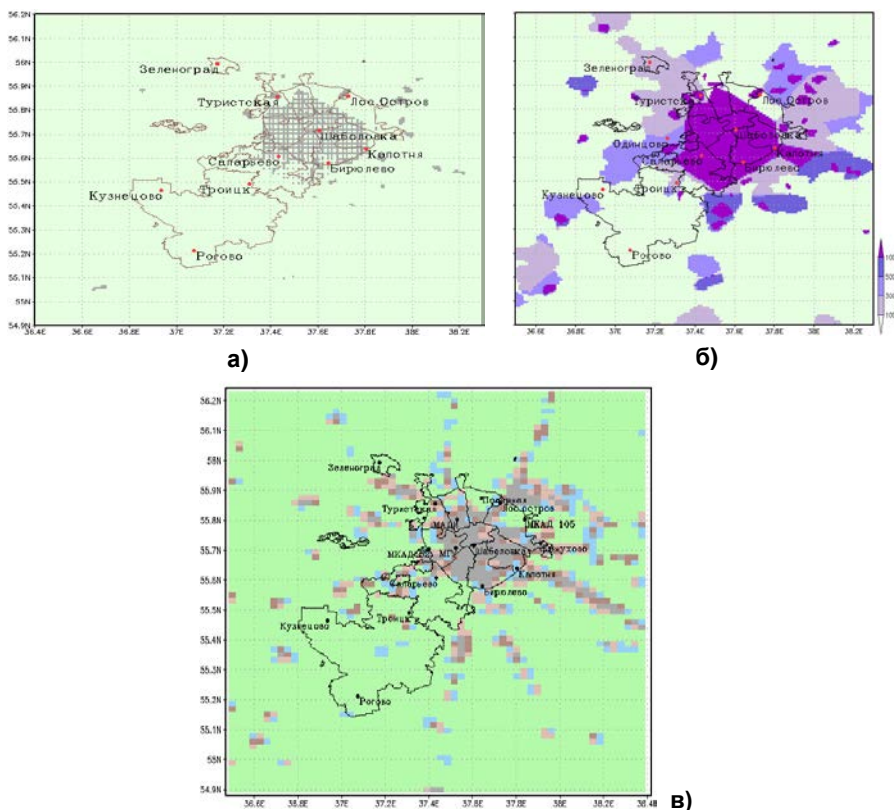


Рис. 4. Карта дорожной сети (а), плотности населения (б) и городской застройки (в) прокси-файлов для московского региона.

Fig. 4. Map of road network (a), population density (б) and urban development (в) of proxy files for the Moscow region.

Расчет газообразных веществ в CHIMERE-2023 производится по схеме MELCHIOR2 с 44 видами и около 120 реакциями. Поглощение воды нитратами, сульфатами и аммонием в ненасыщенных условиях представлено в модуле ISORROPIA. Скорости фотолиза обновляются каждые 5 минут вызовом модуля Fast-JX. Благодаря включению этого блока в модель CHIMERE-2023 появилась возможность учесть радиационное воздействие аэрозолей на фотохимию, при этом используются данные CHIMERE-2023 для всех видов аэрозолей и тропосферного озона до верхней границы модели и прогнозы метеорологических переменных (температуры, давления и облачного покрова).

Переход на сеточное разрешение CHIMERE-2023 выполняется с учетом землепользования из базы USGS (*United States Geological Survey*) с разрешением 30 угловых секунд ($0.0083^\circ \times 0.0083^\circ = \sim 1 \times 1$ км) и 24 категориями землепользования. Все данные из перечисленных баз поставляются вместе с моделью CHIMERE-2023, что значительно облегчает запуск модели.

При разработке блока препроцессора входных эмиссий было усовершенствовано управление антропогенными выбросами, связанное с уменьшением количества файлов, что очень важно для суперкомпьютеров; в новом формате каждому дню недели соответствует один файл соответствующего месяца и года.

Функционирование технологии

Разработанные модули препроцессинга позволили существенно обновить технологию прогнозирования концентраций загрязняющих веществ на основе актуализированной XTM CHIMERE-2023 с усвоением региональных данных эмиссий EMEP-2021. Актуализированная технология полностью автоматизирована на CRAY, позволяет рассчитывать прогностические концентрации загрязняющих веществ на территории московского региона с заблаговременностью 48 часа. После проверки завершения счета прогнозов метеорологической модели (конфигурация COSMO-Ru2ETR) запускается препроцессинг химической модели: считываются и обрабатываются метеорологические прогнозы, эмиссии загрязняющих веществ. По завершению препроцессинга запускается расчет прогностических концентраций загрязняющих веществ XTM. Полученные результаты визуализируются в виде карт, диаграмм, таблиц для всей области прогноза, а также для отдельных станций по заданному списку.

Аналогично CAMS, но с большей региональной детализацией, созданная технология позволяет визуализировать поля прогностических концентраций по расчетам CHIMERE-2023 на каждый час прогнозируемого периода. На рис. 5 представлены примеры прогностической продукции в виде карт. Хорошо выражена пространственная неоднородность концентраций загрязняющих веществ с различиями в очагах максимумов и окраинами до $35\text{--}50$ $\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$.

На рис. 6 демонстрируется пример синхронизированного прогноза в пункте на двое суток вперед метеорологических характеристик и концентраций загрязняющих веществ. Видно, что пространственно-временная динамика загрязнений в целом согласована с изменчивостью метеорологических условий – с термической стратификацией и высотой атмосферного пограничного слоя, скоростью переноса и влажностью. Совместный анализ метеорологических условий и модельного воспроизведения загрязнения имеет особое значение для выявления причин недостаточно успешного прогноза отдельных загрязняющих веществ.

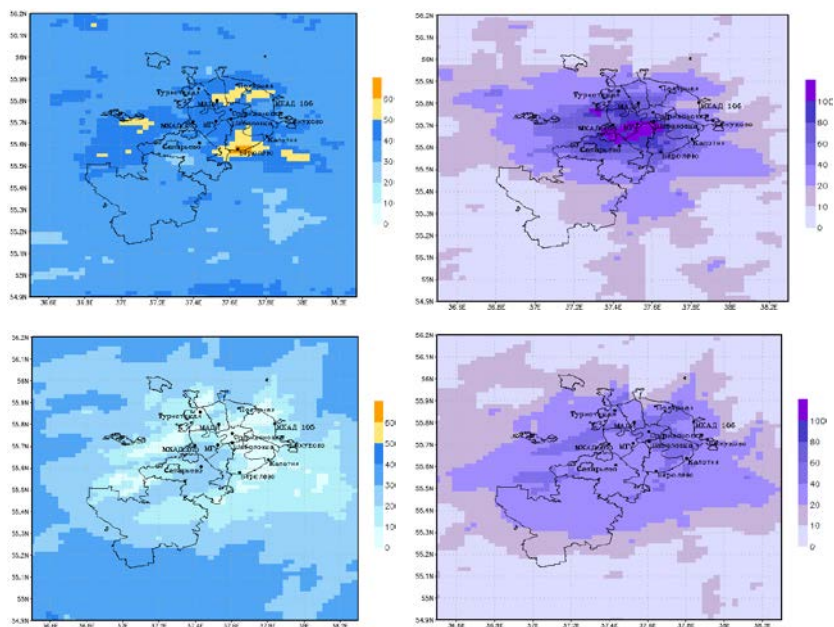


Рис. 5. Прогностические поля концентраций ($\mu\text{г}\cdot\text{м}^{-3}$) O_3 (слева) и NO_2 (справа) по расчетам XTM CHIMERE-2023 на 9 ч ВСВ (верхний ряд) и 21 ч ВСВ 3 сентября 2024 г. (нижний ряд).

Fig. 5. Forecast fields of concentrations ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) of O_3 (left) and NO_2 (right) based on CHIMERE-2023 calculations for 9:00 a.m. on September 3 (top) and for 9:00 p.m. on September 3, 2024 (bottom row).

Верификация прогнозов загрязняющих веществ

Одним из важнейших блоков актуализированной технологии является верификация модельных прогнозов. Запуск обновленной технологии сопровождался проверкой результатов прогнозирования концентраций загрязняющих веществ на ограниченных выборках в мае, июле и сентябре 2024 года, которые использовались для серии численных экспериментов по анализу чувствительности откликов модели CHIMERE-2023 к изменениям некоторых входных данных. Принималось во внимание, что исследования зарубежных авторов [12, 13] показали большую изменчивость концентрации в сценариях сокращения выбросов, например, изменчивость озона при сокращении выбросов достигает 10 %, а в озоновых эпизодах – 100 % или выше. Зарубежными авторами установлено, что комбинированное сокращение выбросов обычно более эффективно, чем сумма сокращений выбросов отдельных предшественников как для O_3 , так и для PM , кроме того, для озона отклики моделей с точки зрения линейности и аддитивности показали явное влияние нелинейных химических процессов.

Часть проведенных нами экспериментов была посвящена изучению отклика модельных расчетов на вариации объемов эмиссий загрязнителей.

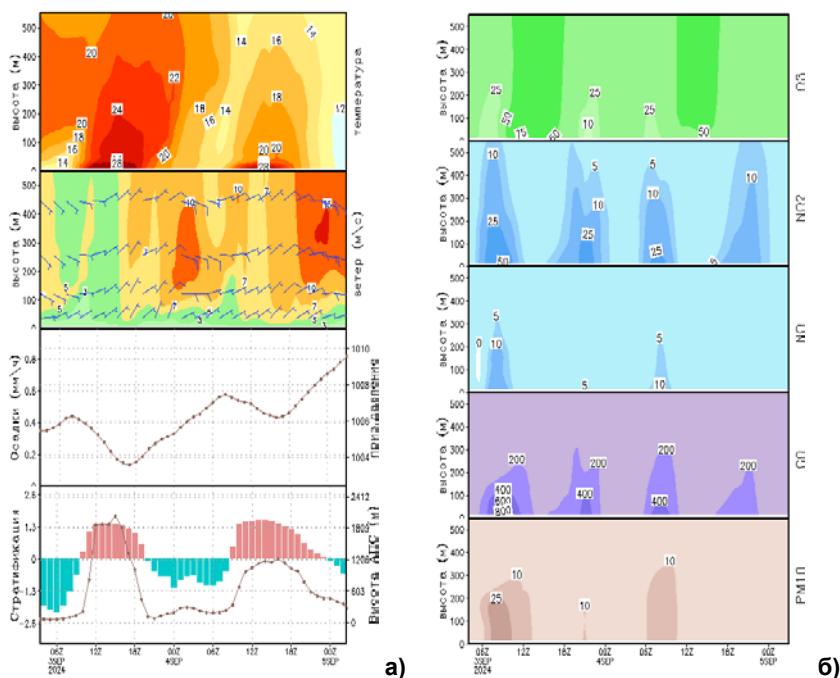


Рис. 6. Временная динамика температуры ($^{\circ}\text{C}$), направления и скорости ветра ($\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$) в нижнем 500-метровом слое, давления (гПа), высоты АПС с градиентом температуры в слое 2–250 м по расчетам COSMO-Ru2ETR (а); концентраций ($\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$) O_3 , NO_2 , NO , CO и PM_{10} (сверху вниз) по расчетам CHIMERE-2023 (б). Прогноз на 3–4 сентября 2024 г.

Fig. 6. Temporal dynamics of temperature ($^{\circ}\text{C}$), wind direction and speed ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) in the lower 500-meter layer, pressure (hPa), ABL (atmospheric boundary layer) height with a temperature gradient in the 2–250 m layer based on COSMO-Ru2ETR calculations (a); concentrations ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) of O_3 , NO_2 , NO , CO and PM_{10} (from top to bottom) according to CHIMERE-2023 calculations (б). Forecast for September 3–4, 2024.

Оказалось, что при интенсивных атмосферных процессах модельные расчеты с увеличенными эмиссиями мало отличаются от базовых (оригинальных) прогнозов. Но при НМУ экспериментальное увеличение выбросов только на 10 % в транспортном секторе (эксперимент 1) и во всех секторах экономики (эксперимент 2) привело к увеличению концентраций загрязнений по сравнению с базовыми расчетами. В частном примере при НМУ 6–8 сентября 2024 г. концентрации NO_2 повысились в ночные часы на 10–15 $\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$, днем – более существенно, на 40–70 $\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$. Наибольший эффект роста NO_2 зафиксирован при одновременном увеличении эмиссий на 10 % всех отраслевых источников (рис. 7). Заметим, что при НМУ добавка выбросов (10 %) дает увеличение средней суточной концентрации NO_2 на 40–70 %. Этот результат указывает на возможный инструмент влияния на модельные расчеты концентраций путем регулирования количества эмиссий.

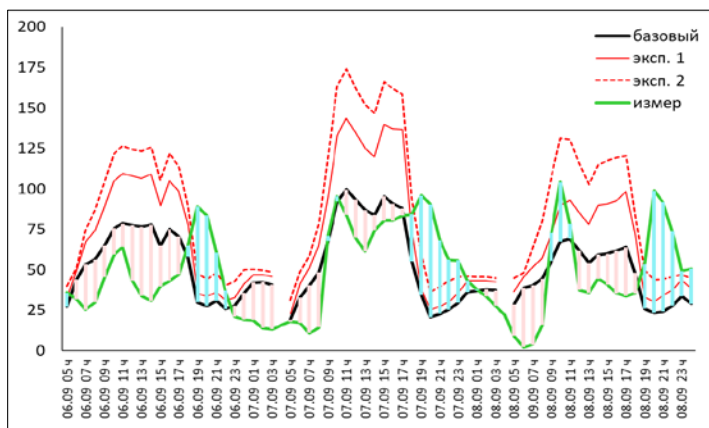


Рис. 7. Измеренные и модельные концентрации NO_2 XTM CHIMERE-2023: базовые, при увеличении эмиссий на 10 % транспортными источниками (эксперимент 1) и всеми антропогенными источниками (эксперимент 2). Розовая заливка – завышение модельных базовых концентраций, голубая – занижение модельных концентраций по базовой конфигурации. Эпизод НМУ 6–8 сентября 2024 г., Москва.

Fig. 7. Measured and model concentrations of NO_2 CHIMERE-2023: baseline, with a 10% increase in emissions from transport sources (experiment 1) and all anthropogenic sources (experiment 2). Pink fill – overestimation of model baseline concentrations, blue – underestimation of model concentrations according to the baseline configuration. AMC (adverse meteorological conditions) episode of September 6-8, 2024, Moscow.

Другим инструментом влияния на качество моделирования является коррекция внутрисуточного распределения эмиссий. В XTM CHIMERE-2023 используется показанное на рис. 8а почасовое распределение эмиссий с помощью коэффициента распределения (K_{cx}). Суточный ход K_{cx} в XTM CHIMERE хорошо согласуется с одномодальным суточным ходом модельных концентраций загрязнений при отсутствии выраженных максимумов утром и вечером, характерных для наблюдаемого загрязнения в мегаполисе. Результаты пяти вариантов коррекции базового распределения K_{cx} (рис. 8а) иллюстрируются на рис. 8б на примере расчетов концентраций NO_2 для одной АСКЗА городского типа.

Коррекция K_{cx} (1) и K_{cx} (2) проводилась только для транспортных источников (эксперименты 3, 4). В эксперименте 5 K_{cx} (2) применен для эмиссий всех источников. Установлено, что во всех трех экспериментах средняя суточная концентрация NO_2 немного уменьшилась, а в суточном ходе появились выраженные утренний и вечерний максимумы (рис. 8б). При этом в утренние часы концентрации по сравнению с базовыми понизились на 15–30 $\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$, а в вечерние часы увеличились на 30–50 $\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$. Применение коррекции K_{cx} (2) ко всем источникам выбросов (эксперимент 5) привело к еще большему завышению вечернего максимума и резкому занижению NO_2 в околополуденное время.

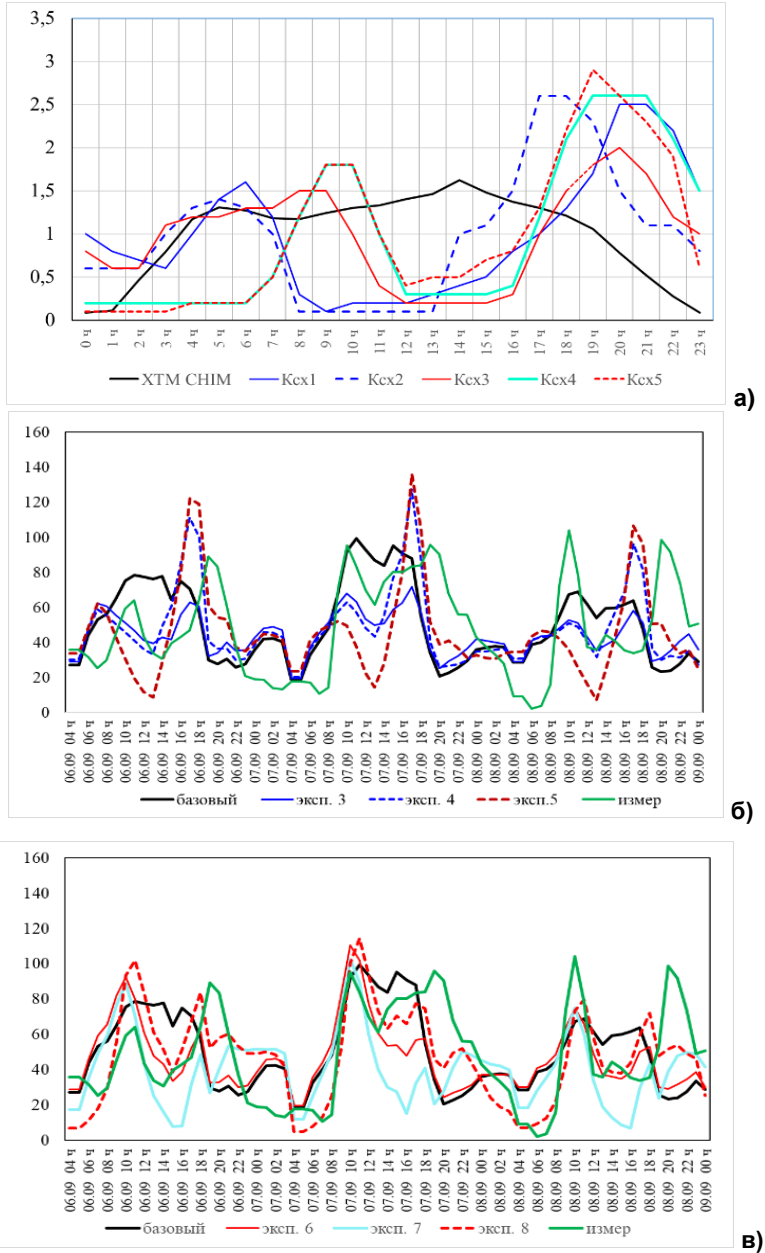


Рис. 8. Почасовые коэффициенты распределения эмиссий загрязняющих веществ: базовые (XTM CHIM) и экспериментальные K_{cx} (а); измеренные и модельные концентрации NO_2 по расчетам XTM CHIMERE-2023 с применением коррекции K_{cx} (б, в).

Fig. 8. Hourly distribution coefficients of pollutant emissions: baseline (CHIM) and experimental K_{cx} (a); measured and model NO_2 concentrations according to CHIMERE-2023 CHIM calculations using K_{cx} correction (б, в).

Таким образом, преобразованные K_{cx} (1) и K_{cx} (2) влияют на изменение формы суточного хода модельных расчетов, но по сравнению с измерениями приводят к заниженным утренним и завышенным вечерним концентрациям NO_2 .

Для усиления утреннего максимума, ослабления вечернего максимума и смещения его на более позднее время выполнены расчеты с применением K_{cx} (3–5). Оказалось, что наилучшее согласие с измеренными концентрациями дает применение K_{cx} (3) и K_{cx} (5), а K_{cx} (4) обеспечивает сильное уменьшение послеполуденных концентраций, что видно по динамике концентраций NO_2 на рис. 8в.

Полученный в серии экспериментальных расчетов наибольший положительный эффект в период НМУ зафиксирован при замене базовых K_{cx} на скорректированные коэффициенты внутрисуточного распределения эмиссий K_{cx} (5): модельная средняя за сутки концентрация NO_2 совпала с измеренной величиной, форма суточного хода NO_2 оказалась близкой к наблюдаемому ходу при небольшом завышении утреннего максимума и занижении вечернего. Безусловно, для применения результатов на практике необходимо на репрезентативном ряде в широком диапазоне метеорологических условий провести сравнительные оценки других загрязняющих веществ (CO , PM_{10}), обсуждение которых в условиях ограничений объема статьи здесь не предлагается.

За месячный период 1–30 сентября 2024 г. были выполнены модельные расчеты концентраций загрязняющих веществ по регионально адаптированной конфигурации CHIMERE-2023 (Chim-P) с увеличением на 10 % эмиссий оксидов азота и с измененным суточным распределением эмиссий и в базовой конфигурации CHIMERE-2023 (Chim). Оценивались прогнозы O_3 , NO_2 и PM_{10} на первые и вторые сутки с использованием измерений концентраций загрязняющих веществ на АСКЗА Москвы.

Ориентируясь на гигиенический норматив – максимальную за сутки концентрацию O_3 , оценивались прогнозы суточного максимума O_3 (O_{3max}) для станций жилого типа. Оказалось, что при средней за месяц O_{3max} по наблюдениям на АСКЗА 35–43 $мкг \cdot м^{-3}$ систематическая ошибка прогнозов O_{3max} составила -5 и -7 $мкг \cdot м^{-3}$ (на первые и вторые сутки соответственно). Незначительно отличаются и другие характеристики прогнозов на первые и вторые сутки: средняя абсолютная ошибка на отдельных АСКЗА находится в диапазоне 16–25 $мкг \cdot м^{-3}$, среднеквадратическая ошибка (RMSE) немного больше 19–33 $мкг \cdot м^{-3}$. Следует отметить, что из-за аномально теплой и сухой погоды в Москве наблюдавшиеся уровни O_{3max} в сентябре 2024 г. были выше многолетних величин на 15–18 % [4] с соответствующими увеличенными межсуточными колебаниями приземного озона.

При интерпретации результатов экспериментального тестирования твердых взвешенных частиц PM_{10} также необходимо принимать во внимание, что из-за преобладающего в течение месяца поступления в Москву насыщенных пылевыми частицами воздушных масс уровень PM_{10}

по наблюдениям на АСКЗА оказался в 1,4–1,8 раз выше многолетних значений [5]: на АСКЗА городского типа средняя за месяц концентрация PM_{10} оказалась в диапазоне 30–46 $мкг \cdot м^{-3}$. Адвекция PM_{10} осуществлялась из охваченных засухой приволжских и южных районов ЕТР, а в конце сентября зафиксирован эпизод повышения PM_{10} из-за дальнего переноса частиц из районов пыльных бурь Прикаспия и Нижней Волги. Заметим, что средняя месячная величина PM_{10} на АСКЗА городского типа в предшествующем августе 2024 г. составила 25 $мкг \cdot м^{-3}$, такой же является осредненная за 15 лет (2005–2020 гг.) концентрация PM_{10} в сентябре – около 25 $мкг \cdot м^{-3}$ [5]. Таким образом, можно говорить, что в сентябре 2024 г. вклад адвективного аэрозоля в загрязнение PM_{10} воздуха в Москве сравним с величиной фона, который и воспроизводился CHIMERE-2023. При этом результаты счета Chim-P и на первые, и на вторые сутки оказались ближе к измерениям, чем расчеты Chim, но указывали на значительную недооценку моделью концентраций PM_{10} даже с учетом погрешности измерений (15–20 %). И необходимо подчеркнуть, что эффективность выполненной коррекции возростала в периоды НМУ, когда фиксировался наибольший рост концентраций PM_{10} .

Похожий результат получен и при проверке расчетов средней суточной концентрации NO_2 в конфигурациях Chim и Chim-P, принимая во внимание, что в сентябре 2024 г. средняя за месяц концентрация NO_2 на станциях городского типа была примерно в 1,5 раза больше средней многолетней величины, примерно равной 30 $мкг \cdot м^{-3}$ [5]. ХТМ CHIMERE-2023 значительно занижала в прогнозах концентрацию NO_2 , что следует расценивать не только как неспособность ХТМ отражать аномальный уровень загрязнения, но и как необходимость последовательной региональной коррекции эмиссий NO_x .

В заключение следует признать, что несмотря на аномальность периода месячной проверки (сентябрь 2024 г.) экспериментальное тестирование обновленной ХТМ позволило обозначить ключевые направления последующей региональной адаптации CHIMERE-2023 с применением отлаженных механизмов регулирования сезонных и внутрисуточных эмиссий загрязняющих веществ в различных отраслевых секторах.

Заключение

На вычислительной платформе CRAY Росгидромета актуализирована одна из последних версий химической транспортной модели CHIMERE-2023 с обновленным интерфейсом. С учетом того, что ХТМ CHIMERE-2023 разрабатывалась и настраивалась в первую очередь для использования в странах Евросоюза, установка обновленной версии сопровождалась серией численных экспериментов по оптимизации расчетов для московского региона, региональным подбором параметров сезонного и суточного распределения эмиссий используемого кадастра ЕМЕП-2021. Результаты экспериментального тестирования обновленной технологии указывают

в целом на удовлетворительное качество прогнозирования приоритетных загрязняющих веществ и указывают на целесообразность исследований и работ по региональной адаптации технологии прогнозирования с соответствующей проверкой на репрезентативных рядах моделирования и наблюдений в разные сезоны.

Список литературы

1. Борисов Д.В., Кузнецова И.Н. Интегрирование химической транспортной модели и искусственной нейронной сети для прогноза концентрации PM_{10} // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. № 3 (393). С. 42-63. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-3-41-62>.
2. Борисов Д.В., Кузнецова И.Н. Постпроцессинг численных прогнозов концентраций приземного озона с использованием машинного обучения // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 4 (390). С. 86-104. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-4-86-104>.
3. Вильфанд Р.М., Кирсанов А.А., Ревокатова А.П., Ривин Г.С., Суркова Г.В. Прогноз перемещения и трансформации загрязняющих веществ в атмосфере с помощью модели COSMO-ART // Метеорология и гидрология. 2017. № 5. С. 31-40. DOI: 10.3103/S1068373917090047.
4. Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Лезина Е.А. Содержание озона над территорией Российской Федерации в 2024 г. // Метеорология и гидрология. 2025. № 3. С. 136-141. DOI: 10.52002/0130-2906-2025-1-136-141.
5. 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. DOI: 10.31857/s0002351522010023
6. Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Кирсанов А.А., Борисов Д.В., Ткачева Ю.В., Ривин Г.С., Лезина Е.А. Тестирование и перспективы технологии прогнозирования загрязнения воздуха с применением химических транспортных моделей CHIMERE и COSMO-Ru2ART // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 4 (386). С. 147-170. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-4-147-170>.
7. 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. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2019-4-203-218>.
8. Официальный сайт CEIP (Centre on Emission Inventories and Projections, Центр кадастров и прогнозов выбросов). Режим доступа: URL: <https://www.ceip.at/the-emep-grid/grid-ded-emissions>.
9. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Тудрий К.О., Блинов Д.В., Варенцов М.И., Захарченко Д.И., Самсонов Т.Е., Репина И.А., Артамонов А.Ю. Разработка оперативной системы численного прогноза погоды и метеоусловий опасных явлений с высокой детализацией для Московского региона // Метеорология и гидрология. 2020. № 7. С. 5-19.
10. Розинкина И.А., Ривин Г.С., Багров А.Н., Блинов Д.В. и др. Конфигурация COSMO-Ru2Bu модели COSMO: успешность и методология оценки численных прогнозов и γ -мезомасштабных атмосферных процессов // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 2 (388). С. 6-34. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-2-6-34>
11. Chubarova N.E., Androsova E.E., Kirsanov A.A., Varentsov M.I., Rivin G.S. Urban aerosol, its radiative and temperature response in comparison with urban canopy effects in megacity based on COSMO-ART modeling // Urban Climate. 2024. Vol. 53. С. 101762. DOI: 10.1016/j.uclim.2023.101762.

12. Bessagnet B., Bossiol E., Cholakian A., Vivanco M.G. et al. Impact of air quality model settings for the evaluation of emission reduction strategies to curb air pollution // *Environ. Res.* 2024. Vol. 255. P. 119112. DOI: 10.1016/j.envres.2024.119112.

13. Bessagnet B., Cuvelier K., de Meij A., Monteiro A. et al. Assessment of the sensitivity of model responses to urban emission changes in support of emission reduction strategies // *Air Quality, Atmosphere and Health.* 2024. Vol. 17, is. 4. P. 681-706.

14. Lee P., Tong D. et al. World Meteorological Organization, Training Materials and Best Practices for Chemical Weather /Air Quality Forecasting (ETR-26). Geneva: WMO, 2020. 1152 p. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10439.

15. Mailler S., Pennel R., Menut L., Lachatre M. Using an antidiffusive transport scheme in the vertical direction: a promising novelty for chemistry-transport models // *Geosci. Model Dev.* 2021. Vol. 14. P. 2221-2233. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-14-2221-2021>.

16. Menut L., Bessagnet B., Khvorostyanov D., Beekmann M. et al. CHIMERE 2013: A model for regional atmospheric composition modelling // *Geosci. Model Dev.* 2013. Vol. 6, is.4. P. 981-1028.

17. Menut L., Cholakian A., Pennel R., Siour G. et al. The CHIMERE chemistry-transport model v2023r1 // *Geosci. Model Dev.* 2024. Vol. 17. P. 5431-5457. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-17-5431-2024>.

18. Menut L., Goussebaile A., Bessagnet B., Khvorostyanov D. et al. Impact of realistic hourly emissions profiles on air pollutants concentrations modelled with CHIMERE // *Atmospheric Environment.* 2012. Vol. 49. P. 233-244.

19. Valari M., Menut L. Transferring the heterogeneity of surface emissions to variability in pollutant concentrations over urban areas through a chemistry-transport model // *Atmospheric Environment.* 2010. Vol. 44, is. 27. P. 3229-3238. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.06.001>.

References

1. Borisov D.V., Kuznetsova I.N. Integration of a chemical transport model and an artificial neural network for PM10 concentration forecasting. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2024, vol. 393, no. 3, pp. 42-63. DOI: 10.37162/2618-9631-2024-3-41-62 [in Russ.].

2. Borisov D.V., Kuznetsova I.N. Post-processing of ground-level ozone numerical forecasts using machine learning. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2023, vol. 390, no. 4, pp. 86-104. DOI: 10.37162/2618-9631-2023-4-86-104 [in Russ.].

3. Vil'fand, R.M., Kirsanov, A.A., Revokatova, A.P., Rivin G.S., Surkova G.V. Forecasting the transport and transformation of atmospheric pollutants with the COSMO-ART model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, no. 5, pp. 292-298. DOI: 10.3103/S106837391705003X.

4. Ivanova N.S., Kuznetsova I.N., Lezina E.A. Soderzhanie ozona nad territoriyey Rossiyskoy Federacii v 2024 g. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 2025, no. 3, pp. 136-141. DOI: 10.52002/0130-2906-2025-1-136-141 [in Russ.].

5. 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/S00014338220100296.

6. Kuznetsova I.N., Nakhaev M.I., Kirsanov A.A., Borisov D.V., Tkacheva Yu.V., Rivin G.S., Lezina E.A. Testing and prospects of air pollution prediction technology based on CHIMERE and COSMO-Ru2ART chemical transport models. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2022, vol. 386, no. 4, pp. 147-170. DOI: 10.37162/2618-9631-2022-4-147-170 [in Russ.].

7. Kuznetsova 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. DOI: 10.37162/2618-9631-2019-4-203-218 [in Russ.].

8. CEIP (Centre on Emission Inventories and Projections). Available at: <https://www.ceip.at/the-emep-grid/gridded-emissions>.

9. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Vil'fand R.M., Varentsov M.I., Zakharchenko D.I., Samsonov T.E., Repina I.A. 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, no. 7, pp. 455-465. DOI: 10.3103/S1068373920070018.

10. Rozinkina I.A., Rivin G.S., Bagrov A.N., Blinov D.V., Bykov F.L., Vaskova D.V., Zakharchenko D.I., Bundel A.Yu., Vorobyeva E.V., Kirsanov A.A., Polyukhov A.A., Shatunova M.V., Shuvalova Yu.O., Eliseev G.V. The COSMO-Ru2By configuration of the COSMO model: skill and methodology for estimating of the forecasts of B- and y-mesoscale processes. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2023, vol. 388, no. 2, pp. 6-34. DOI: 10.37162/2618-9631-2023-2-6-34 [in Russ.].

11. Chubarova N.E., Androsova E.E., Kirsanov A.A., Varentsov M.I., Rivin G.S. Urban aerosol, its radiative and temperature response in comparison with urban canopy effects in megacity based on COSMO-ART modeling. *Urban Climate*, 2024, vol. 53, pp. 101762. DOI: 10.1016/j.uclim.2023.101762.

12. Bessagnet B., Bossiol E., Cholakian A., Vivanco M.G. et al. Impact of air quality model settings for the evaluation of emission reduction strategies to curb air pollution. *Environ. Res.*, 2024, vol. 255, pp. 119112. DOI: 10.1016/j.envres.2024.119112.

13. Bessagnet B., Cuvelier K., de Meij A., Monteiro A. et al. Assessment of the sensitivity of model responses to urban emission changes in support of emission reduction strategies. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 2024, vol. 17, no. 4, pp. 681-706.

14. Lee P., Tong D. et al. World Meteorological Organization, Training Materials and Best Practices for Chemical Weather /Air Quality Forecasting (ETR-26). Geneva: WMO, 2020, 1152 p. Available at: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10439.

15. Mailler S., Pennel R., Menut L., Lachatre M. Using an antidiffusive transport scheme in the vertical direction: a promising novelty for chemistry-transport models. *Geosci. Model Dev.*, 2021, vol. 14, pp. 2221-2233. DOI: 10.5194/gmd-14-2221-2021.

16. Menut L., Bessagnet B., Khvorostyanov D., Beekmann M. et al. CHIMERE 2013: A model for regional atmospheric composition modeling. *Geosci. Model Dev.*, 2013, vol. 6, no. 4, pp. 981-1028.

17. Menut L., Cholakian A., Pennel R., Siour G. et al. The CHIMERE chemistry-transport model v2023r1. *Geosci. Model Dev.*, 2024, vol. 17, pp. 5431-5457. DOI: doi.org/10.5194/gmd-17-5431-2024

18. Menut L., Goussebaile A., Bessagnet B., Khvorostyanov D. et al. Impact of realistic hourly emissions profiles on air pollutants concentrations modelled with CHIMERE. *Atmospheric Environment*, 2012, vol. 49, pp. 233-244.

19. Valari M., Menut L. Transferring the heterogeneity of surface emissions to variability in pollutant concentrations over urban areas through a chemistry-transport model. *Atmospheric Environment*, 2010, vol. 44, no. 27, pp. 3229-3238. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2010.06.001.

Поступила 20.02.2025; одобрена после рецензирования 04.06.2025;
принята в печать 18.06.2025.

Submitted 20.02.2025; approved after reviewing 04.06.2025;
accepted for publication 18.06.2025.