

УДК 504.3.054+504.75

Система прогнозирования качества воздуха на основе химических транспортных моделей

*И.Н. Кузнецова¹, И.Ю. Шалыгина¹, М.И. Нахаев¹, Ю.В. Ткачева¹,
Г.С. Ривин¹, А.А. Кирсанов¹, Д.В. Борисов¹, Е.А. Лезина²*

*¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

²ГПБУ "Мосэкомониторинг", г. Москва, Россия

Описана созданная в Гидрометцентре России в последние годы система численного оперативного прогнозирования загрязнения воздуха. Расчеты концентраций загрязняющих веществ выполняются химическими транспортными моделями CHIMERE и COSMO-ART с усвоением метеорологических прогностических данных системы COSMO-Ru7 и данных эмиссий EMEP, TNO. Обсуждаются проблемы качества эмиссий глобальных кадастров, способы их коррекции с учетом специфики регионального загрязнения воздуха. Кратко описана разработанная методика подготовки данных о реальных выбросах городского автотранспорта для усвоения их химической транспортной моделью. Приводятся примеры эффективного применения постпроцессинга модельных расчетов концентраций. Представлены направления развития системы прогнозирования качества воздуха с применением ХТМ.

Ключевые слова: прогноз качества воздуха, химическая транспортная модель, региональная адаптация эмиссий, выбросы автотранспорта

Air quality forecasting system based on chemical transport models

*I.N. Kusnetsova¹, I.U. Shalygina¹, M.I. Nahaev¹, U.V. Tkacheva¹,
G.S. Rivin¹, A.A. Kirsanov¹, D.V. Borisov¹, E.A. Lezina²*

¹Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

*²Budgetary environmental protection institution «MosEcoMonitoring»,
Moscow, Russia*

A system for the numerical operational prediction of air pollution developed in the Hydrometeorological Center of Russia in the recent years is described. The simulations of pollutant concentrations are performed by the CHIMERE and COSMO-ART chemical transport models (CTM) using the COSMO-Ru7 system weather forecast data and the EMEP and TNO emission databases. The problems of the quality of global emission inventory data and the methods for their correction with account of specific features of regional air pollution are discussed. The developed technique for preparing real data of urban motor vehicle emissions for their assimilation in chemical transport models is briefly described. The examples of the effective application of postprocessing of simulated concentrations are given. The future plans on the CTM-based air quality forecasting system development are presented.

Keywords: air quality forecast, chemical transport model, regional adaptation of emissions, vehicle emissions

Введение

Стратегическая задача по созданию эффективной системы снижения рисков и принятия мер по защите и минимизации ущерба от воздействия неблагоприятных явлений окружающей среды базируется на оценке качества воздуха. Решение этой задачи невозможно без наличия прогнозов актуальных концентраций загрязняющих веществ или рассчитанных на их основе интегральных показателей качества воздуха.

Современным инструментом прогнозирования качества воздуха служат химические транспортные модели (ХТМ), позволяющие рассчитывать поля концентраций многих веществ, включая мелкодисперсные частицы (PM_{10} , $PM_{2,5}$) и озон в приземном воздухе, которые, по мнению Всемирной организации здравоохранения, являются приоритетными загрязнителями при оценке качества воздуха [2, 3, 5, 7, 14, 19, 21, 22, 24, 28].

Эффективность прогнозирования качества воздуха на основе ХТМ во многом определяется качеством начальных данных об источниках антропогенного загрязнения и точностью прогноза используемых метеорологических величин [8, 13, 16, 19]. Современные численные модели атмосферы и уровень вычислительной техники [1, 11, 25] позволяют прогнозировать загрязнение воздуха с высоким горизонтальным разрешением (1–2 км).

Переход на численные модели более мелкого шага с описанием процессов переноса и рассеивания примеси городского масштаба неразрывно связан с необходимостью обеспечения информацией соответствующего разрешения об источниках выбросов в атмосферу, данных о застройке и типах подстилающей поверхности. Городские химические транспортные модели («urban CTM») реализуются чаще всего для экспериментальных расчетов [7, 16, 19–22]; наиболее известная «urban CTM» ADAMS применяется в Великобритании, Франции и некоторых других зарубежных странах [26], обладающих вычислительной техникой высокого уровня. В нашей стране, несмотря на использование современных численных моделей, обеспечение ХТМ данными об эмиссиях остается крайне актуальной задачей, поскольку отсутствует механизм всеобщей инвентаризации выбросов вредных веществ в атмосферу, включая транспорт.

Применение ансамблевого подхода обеспечило существенный прогресс при прогнозировании качества воздуха на региональном уровне в проекте CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) – одной из шести служб программы наблюдения Земли Европейского Союза Copernicus (<https://atmosphere.copernicus.eu/data>). В ансамблевом прогнозе CAMS используются расчеты семи химических транспортных моделей: CHIMERE,

МОСАЖЕ, ЕМЕР, EURAD-IM, LOTOS-EUROS, MATCH и SILAM, разработанных во Франции (первые две), Норвегии, Германии, Нидерландах, Швеции и Финляндии соответственно. Разброс между данными разных моделей может использоваться для предоставления информации о неопределенности ансамблевой продукции, позволяющей показать пользователям доверительный интервал точности прогнозов.

Нынешний уровень развития общества предъявляет требования к повышению осведомленности населения о загрязнении воздуха на планете. В 2007 году был реализован некоммерческий Проект WAQI (World Air Quality Index, aqicn.org, <https://waqi.info/>), который предоставляет информацию о качестве воздуха для 88 стран, охватывающую более 11000 станций в 1000 крупных городах мира.

В последнее время резко возросла актуальность получения информации о распространении опасного аллергена (пыльцы растений). Для этого на базе онлайн технологий появились численные модели, ориентированные на прогноз переноса пыльцы. Так, по модели Финского метеорологического института на сайте (<http://silam.fmi.fi>) выдается прогноз распространения пыльцы на трое суток. На сайте (<https://www.polleninfo.org/RU/ru.html>) размещено Приложение для страдающих аллергией на пыльцу. При поддержке Австрийской информационной службы по пыльце (www.pollenwarndienst.at) в Медицинском университете Вены рассчитывается прогноз пыльцы в Европе на ближайшие три дня.

Технология прогнозирования загрязнения воздуха

В нашей стране технология прогнозирования концентраций загрязняющих веществ на основе химических транспортных моделей с усвоением оперативных данных численных моделей атмосферы впервые была создана в Гидрометцентре России [2, 3, 7, 8, 14], что было обеспечено рядом благоприятных факторов. К их числу относятся запуск суперкомпьютера Росгидромета, реализация на его вычислительной базе двух химических транспортных моделей COSMO-ART и XTM CHIMERE, тестирование этих XTM по данным автоматизированных измерений концентраций загрязняющих веществ на более 40 станциях городского и примагистрального типа московского мегаполиса (<http://mosecom.ru/>). Развитию технологии прогнозирования способствовали также экспериментальные расчеты в различных конфигурациях XTM, подтверждение эффективности региональной коррекции глобального кадастра объемов выбросов в атмосферу загрязняющих веществ, разработка и апробация методики усвоения в XTM данных о выбросах в атмосферу автотранспорта.

На рис. 1 отображена общая схема реализованной технологии прогнозирования и визуализации концентраций загрязняющих веществ с помощью XTM в Гидрометцентре России с усвоением метеорологических

прогнозов системы COSMO-Ru7. Основные характеристики химических транспортных моделей, составляющих вычислительный блок системы прогнозирования, подробно описаны в [2, 5, 7, 8], здесь отметим лишь некоторые из них.

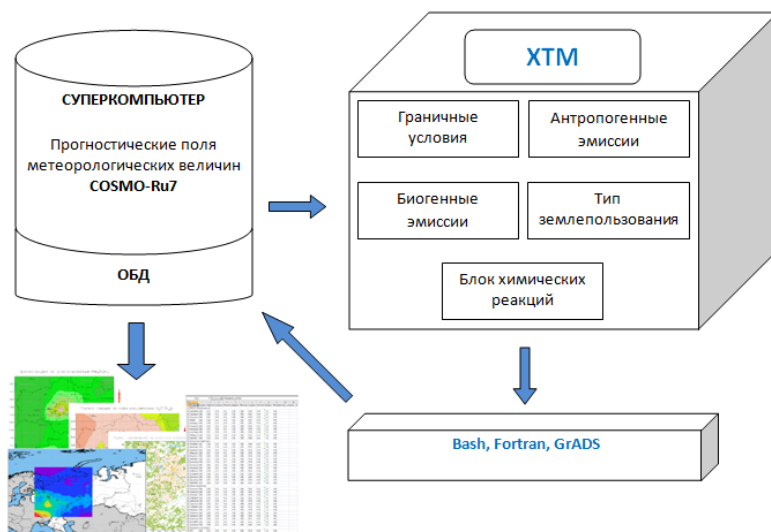


Рис. 1. Технологическая линия XTM.
Fig. 1. Production line of CTM.

COSMO-Ru7-ART состоит из мезомасштабной негидростатической метеорологической модели COSMO-Ru7 (Consortium for Small-scale MOdelling – RUssia) и блока атмосферной химии ART (Aerosols and Reactive Trace gases). В качестве граничных и начальных условий при расчете метеорологических полей используется прогноз оперативной модели COSMO-Ru7 (возможно использование других конфигураций модели COSMO и ICON).

В COSMO-Ru7-ART осуществляется совместный расчет метеорологических величин и химических преобразований на каждом шаге по времени, тем самым учитывается обратное влияние аэрозолей на радиационные процессы и метеорологический режим атмосферы [2, 5, 9].

Основой расчета пространственных и временных изменений концентраций малых газовых примесей в COSMO-Ru7-ART служит трехмерное уравнение диффузии. Его граничными условиями являются данные о выбросах газовых примесей. Химические процессы в тропосфере представлены 172 реакциями; рассчитываются концентрации оксидов азота, углерода и серы, азотной и серной кислоты, озона, пероксида водорода, альдегидов, кетонов, алканов и алкенов. Для работы химического блока COSMO-Ru7-ART используются также данные о категориях землепользования (GLC2000 или GLOBCOVER2009), данные о выбросах веществ

TNO (Netherlands Organization for Applied Scientific Research) [27]. Биогенные эмиссии рассчитываются в модели по данным о землепользовании, температуре и потоке радиации. На границах области моделирования задаются климатические данные о концентрациях газов и аэрозолей.

В XTM CHIMERE производятся расчеты изменений концентраций примесей с учетом переноса, влияния источников и стоков с усвоением прогностических полей метеорологических характеристик COSMO-Ru7. В действующей конфигурации предусмотрен расчет 80 веществ на основе более 300 реакций (блок газофазных реакций MELCHIOR-1). На каждом шаге периода прогноза рассчитываются биогенные и антропогенные эмиссии с использованием данных ЕМЕП с разрешением $0,5 \times 0,5^\circ$ (www.emep.int). Поля эмиссий с более высоким разрешением рассчитываются путем распределения эмиссий внутри каждой модельной ячейки с учетом типа землепользования и плотности населения. Разделение годовых эмиссий по сезонам, дням и часам в течение суток проводится при помощи встроенных процедур (GENEMIS). Биогенные эмиссии рассчитываются в CHIMERE в зависимости от времени года, состояния атмосферы и типа подстилающей поверхности (в текущей конфигурации – отключены). На боковых границах области расчета CHIMERE концентрации примесей задаются по результатам климатического моделирования: для газовых примесей – данные модели MOZART2, для аэрозолей – GOCARD.

В обеих XTM используется метод вложенных сеток. Внешняя сетка CHIMERE в текущей конфигурации имеет разрешение $1 \times 1^\circ$, внутренняя $0,1 \times 0,2^\circ$ (долгота) – примерно 11 км. Горизонтальное разрешение COSMO-Ru7-ART внутри расчетного домена сегодня составляет около 7 км. Результаты модельных расчетов величин концентраций загрязняющих веществ в узлах модельной сетки на каждый час прогноза записываются в оперативную базу данных, которые на следующих этапах технологии используются для подготовки конечной модельной продукции с применением процедуры постпроцессинга и визуализации результатов (см. рис. 1).

Составляющим блоком созданной системы прогнозирования является верификация модельных расчетов концентраций загрязняющих веществ обеих XTM по данным наблюдений на стационарных постах. Сопоставление модельных расчетов с усредненными измерениями на станциях, расположенных в соответствующей ячейке, необходимо не только для осуществления мониторинга успешности прогнозирования, но и для выработки рекомендаций и правил постобработки модельных расчетов.

Коррекция региональных эмиссий

Экспериментальные расчеты концентраций загрязняющих веществ и сравнение их с измерениями позволили установить, что отклонения концентраций «модель – измерения» минимизируются в условиях

интенсивного атмосферного рассеивания и увеличиваются, достигая максимума в случае неблагоприятных для рассеивания метеорологических условиях [6, 13]. На расчет концентраций существенное влияние оказывают ошибки временного распределения и количества эмиссий [8, 13, 16, 19]. Именно в таких случаях наиболее эффективна процедура коррекции эмиссий.

В расчетах ХТМ CHIMERE для московского региона используются данные об эмиссиях кадастра открытого доступа ЕМЕР (Европейская программа мониторинга и оценки) с шагом сетки $0,5 \times 0,5^\circ$ [10]. Расчетную область ХТМ московского региона описывают 6 ячеек кадастра ЕМЕР; на модельную сетку эмиссии пересчитываются встроенными процедурами с учетом данных о землепользовании [10].

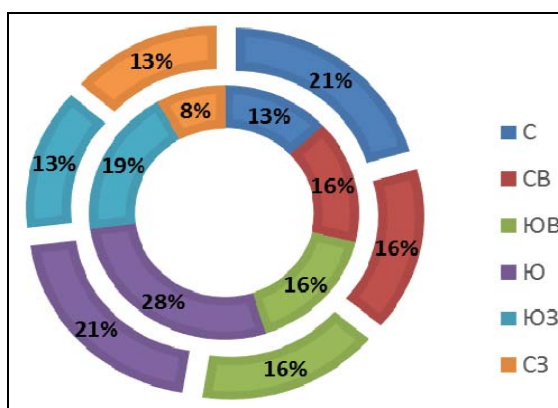
В Москве основным источником (около 90 %) поступающих в атмосферу города загрязняющих веществ является равномерно распределенный по территории города автотранспорт (<http://mosecom.ru>). На рис. 2а показано процентное распределение объема эмиссий СО по географическим секторам мегаполиса, распределение ЕМЕР2013 отражено во внутреннем кольце. Но по данным ЕМЕР 2013 года (далее ЕМЕР2013) 28 % от объема эмиссий СО приходится на южную ячейку (рис. 2а, внутреннее кольцо), при этом эмиссии в северо-западном секторе города сильно занижены (8 %).

Предпринята процедура пространственного выравнивания эмиссий преобладающих загрязняющих веществ (СО и NO_x), объем выбросов которых составляет около 85 % от общего валового выброса. Результаты пространственной коррекции, за исключением северо-восточного и юго-восточного секторов, (ЕМЕР2013корр) показаны на рис. 2а в виде внешнего кольца.

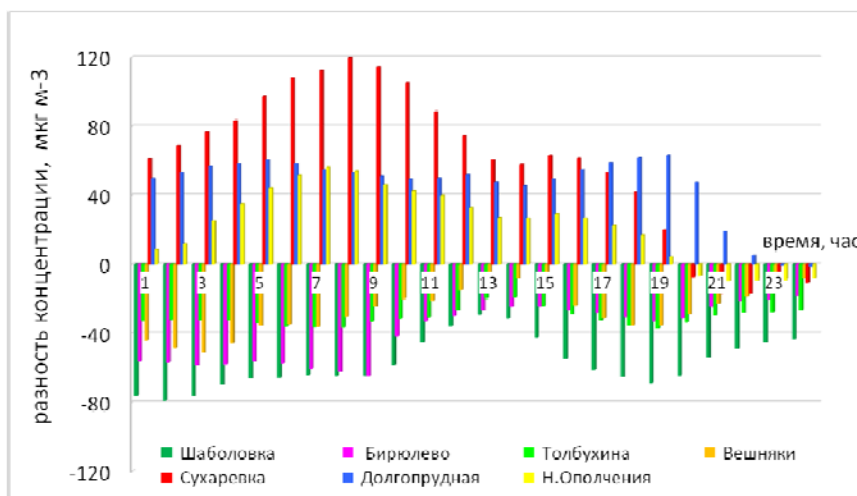
Расчеты концентраций загрязняющих веществ ХТМ CHIMERE с усвоением скорректированных эмиссий показали, что в южной части города модельные концентрации уменьшились, в центре и на северо-западе – увеличились, что подтверждает эффективность процедуры коррекции эмиссий. На рис. 2б видна суточная динамика разности концентрации СО, рассчитанной с данными эмиссий ЕМЕР2013 и ЕМЕР2013корр.

Регулярные сравнения расчетов ХТМ CHIMERE с данными автоматизированной сети контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) в Москве позволили также установить, что погрешности модельных расчетов концентрации загрязняющих веществ имеют выраженную сезонную динамику. Процедурой сезонного распределения эмиссий в ХТМ CHIMERE предусмотрен минимум выбросов оксида углерода и окислов азота в холодный сезон, а модельный годовой максимум эмиссий – в теплый сезон (табл. 1). Вместе с тем по данным многолетних наблюдений АСКЗА (ГПБУ «Мосэкомониторинг») минимум концентраций оксида углерода приходится на июнь, октябрь и ноябрь, а средние наибольшие концентрации наблюдаются в августе-сентябре и декабре. Для сезонной коррекции

эмиссий в секторе «транспорт» использовались данные аналитического отчета компании «Яндекс» (https://yandex.ru/company/researches/2017/moscow_traffic_2017). В отчете показано, что наибольший объем выбросов в атмосферу загрязнений от сжигания топлива автотранспортом приходится на ноябрь, декабрь и апрель; в летние месяцы транспортная нагрузка в Москве достигает годового минимума (табл. 1).



а)



б)

Рис. 2. Распределение эмиссий CO по секторам г. Москвы: ЕМЕП2013 и ЕМЕП2013корр (а), пример суточного изменения разности концентрации CO ($\mu\text{г м}^{-3}$), рассчитанной с данными эмиссий до и после коррекции (б).
Fig. 2. Distribution of CO emissions by sectors in Moscow: EMEP2013 and EMEP2013corr (a), example of a daily change in the difference in the concentration of CO ($\mu\text{g m}^{-3}$), calculated with emission data before and after correction (b).

Таблица 1. Сезонное распределение (%) выбросов автотранспорта загрязняющих веществ в атмосферу в Москве по данным «Яндекс» и в XTM CHIMERE
Table 1. Seasonal distribution (%) of emissions of polluting substances coming from motor vehicles into the atmosphere in Moscow according to Yandex data and CTM CHIMERE data

Месяцы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Яндекс	8,0	7,9	8,3	8,7	8,1	8,1	7,1	7,4	8,4	9,1	9,0	10,0
CHIMERE	7,5	7,9	8,3	8,5	8,7	8,7	8,5	8,4	8,4	8,8	8,5	7,9

Поскольку эмиссии автотранспорта в Москве составляют большую часть от валового выброса, выполнена коррекция годового хода эмиссий CO и NO_x в XTM CHIMERE в соответствие с сезонной изменчивостью транспортной нагрузки «Яндекс». Тестовые расчеты концентраций CO и NO_x с уточненным сезонным ходом эмиссий показали лучшую сходимость со средними месячными концентрациями на большинстве АСКЗА. Это подтвердило необходимость коррекции эмиссий в отдельные месяцы, в частности для июня и ноября.

Модельное распределение эмиссий (XTM CHIMERE) по дням недели показало слабо выраженное колебание объемов выбросов транспорта в течение недели с максимумом в пятницу и минимумом в выходные дни. Флуктуации дневных экстремумов не превышают 10 %. Согласно аналитическим оценкам «Яндекс», в субботу в Москве загруженность дорог снижается на 20 %, в воскресенье на 50 % по сравнению с рабочими днями. Расчеты с коррекцией недельного хода эмиссий существенного эффекта не дали. Такой результат может свидетельствовать не только о незначительном эффекте недельного уточнения эмиссий, но и отражать воздействие нерегулярных или незапланированных событий и явлений в дорожной системе города (аварии, ремонт, регулирование потоков и пр.). Большой оптимизм в снижении погрешностей прогноза концентраций загрязняющих веществ внушает усвоение XTM данных об эмиссиях с учетом реальных выбросов.

Эмиссии автотранспорта

Усвоение данных инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, в первую очередь выбросов автотранспортом, является одним из способов повышения точности модельных расчетов концентраций загрязняющих веществ [15, 17, 23]. На основе данных Научно-исследовательского института автомобильного транспорта (НИИАТ) о выбросах загрязняющих веществ автотранспортом Москвы [4] разработана методика преобразований и подготовки региональных эмиссий автотранспорта для усвоения XTM [12]. Алгоритм реализации позволяет преобразовывать эмиссии загрязняющих веществ от линейных источников

в регулярную сетку с заданным горизонтальным разрешением. Возможно усовершенствование методики за счет учета характеристик землепользования, орографии и других параметров.

Расчетные эмиссии загрязняющих веществ от автомобильного транспорта были представлены для линейно-кусочных участков транспортной сети г. Москвы (более 22 тыс. участков) с учетом одностороннего и двустороннего движения [12]. Они включали выбросы двух десятков веществ, основная доля которых приходится на окись углерода, оксиды азота, неметановые углеводороды.

Для преобразования неравномерно распределенных кусочно-линейных эмиссий в регулярную модельную сетку с шагом 1–2 км решалась задача гриддинга, использующая обратную квадратичную зависимость, поскольку рассеивание загрязняющих веществ при удалении от источника имеет близкую функциональную зависимость (Гауссово распределение). На рис. 3 представлены визуализированные результаты с разрешением 1 км. Анализ результатов показал, что сетка с шагом 1 км лучше учитывает расположение автодорог и распределение по территории города эмиссий автотранспорта, но вычислительные возможности Гидрометцентра России на данном этапе позволяют оперативно проводить расчеты ХТМ с горизонтальным шагом 2 км.

Сравнение расчетов концентраций загрязняющих веществ по данным о выбросах ЕМЕР2013 и с учетом выбросов автотранспорта Москвы показало эффективность применения данной методики: в южной части города был ослаблен задаваемый ЕМЕР2013 максимум при одновременной локализации в первые часы счета наибольших концентраций вблизи зон максимумов выбросов автотранспорта.

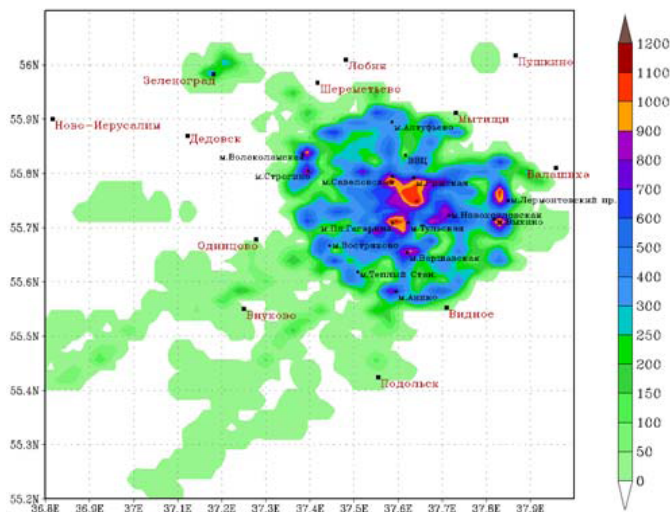


Рис. 3. Выбросы CO, кТ/год на модельной сетке с шагом 2 км.

Fig. 3. Emissions of CO, kilotons per year, on a model grid with 2 km step.

Установлено, что усвоение только транспортных измеренных эмиссий недостаточно для необходимого приближения модельных расчетов концентраций загрязняющих веществ к измеренным. Это означает, что выбросы других секторов промышленности и хозяйственной деятельности пока еще вносят значимый вклад в загрязнение воздуха.

Постпроцессинг по результатам верификация модельных расчетов

Сравнение модельных расчетов концентраций загрязняющих веществ с измеренными на АСКЗА позволяет оценить качество прогнозов. В табл. 2 приводятся отклонения модельной концентрации CO и NO₂ (XTM CHIMERE и COSMO-Ru7-ART) от измеренных в период май 2018 г. – апрель 2019 года.

Таблица 2. Характеристики отклонений «модель – измерение» средней за сутки концентрации CO и NO₂ XTM CHIMERE (Chim) и COSMO-ART (Cosm)
Table 2. Characteristics of deviations “model - measurement” of daily average concentration of CO and NO₂ according to calculation of CTM CHIMERE (Chim) and calculation of COSMO-ART (Cosm)

	CO						NO ₂					
	Среднее		Среднее абсолютное		Среднее СКО		Среднее		Среднее абсолютное		Среднее СКО	
	Chim	Cosm	Chim	Cosm	Chim	Cosm	Chim	Cosm	Chim	Cosm	Chim	Cosm
Май_18	30		100		134		15		17		15	
Июнь_18	119		129		154		18		19		15	
Июль_18	60	-159	95	159	110	66	19	-8	20	9	12	7
Август_18	54	-269	98	269	103	150	25	-18	26	18	11	12
Сентябрь_18	37	-248	107	248	156	184	24	-14	25	15	23	13
Октябрь_18	19	-154	84	155	149	84	11	-9	11	10	14	8
Ноябрь_18	62	-14	98	141	116	145	13	-5	14	8	11	7
Декабрь_18	28	-181	82	185	108	140	7	-13	13	13	17	8
Январь_19	91	-119	113	128	150	92	-1	-13	10	13	13	8
Февраль_19	83	-82	85	85	85	52	-2	-11	6	11	8	4
Март_19	74	-102	89	102	96	44	-1	-16	10	16	13	7
Апр19	227	-476	236	529	196	466	15	-21	16	22	21	13
Среднее*	73	-193	110	166	130	142	12	-13	16	13	14	9

Примечание. *Среднее рассчитано с использованием данных июль 2018 г. – март 2019 г. из-за значительных пропусков расчетов по техническим причинам в другие месяцы

Для каждой модели отмечаются систематические ошибки прогнозов концентрации CO и NO₂: XTM CHIMERE переоценивает уровень загрязнения, COSMO-Ru7-ART его занижает. Та же тенденция отклонений

наблюдается и в модельных прогнозах PM_{10} (рис. 4). Учет систематических ошибок для каждой модели позволяет уменьшить разброс скорректированных прогнозов двух ХТМ.

Другим эффективным способом улучшения модельных расчетов является комплексирование прогнозов двух моделей. На рис. 4 показан прогноз концентрации PM_{10} , составленный с применением двухпараметрического регрессионного уравнения, полученного на ретроспективных рядах «модель – измерение». Отчетливо видно, что такой прогноз, в отличие от прогнозов каждой модели, входит в диапазон концентраций, измеренных на станциях городского и примагистрального типа.

В табл.2 и на рис.4 видна сезонная зависимость модельных ошибок – увеличении их в теплый сезон. Это связано с учащением НМУ летом, но также могут влиять особенности каждой модели в распределении сезонного хода эмиссий.

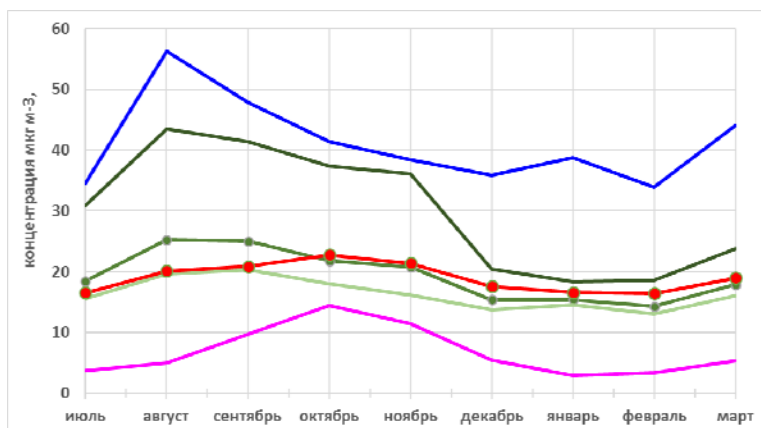


Рис. 4. Средняя за месяц концентрация PM_{10} . Июль 2018 г. – март 2019 г. Модельный расчет: прогноз CHIMERE – синяя линия; прогноз COSMO-ART – розовая; комплексированный прогноз – красная. Измерение: средняя по всем станциям – зеленая линия с маркером; средняя на станциях городского типа – бледно зеленая; средняя на станциях примагистрального типа – темно зеленая.

Fig. 4 Monthly average concentration of PM_{10} . July 2018 - March 2019. Model calculation: CHIMERE forecast – blue line; COSMO-ART forecast – pink line; integrated forecast – red line. Measurement: average for all stations – green line with marker; average for urban stations – pale green line; average for located next by highway stations – dark green line.

В ХТМ CHIMERE, использующей данные кадастра выбросов ЕМЕР, процедурой расчета сезонного хода предусматривается годовой максимум эмиссии CO в феврале-марте и октябре, NO_x и PM_{10} – в феврале-марте. В COSMO-ART годовой максимум эмиссий в Москве приходится на декабрь. Коррекция расчета сезонного распределения количества выбросов

каждого загрязняющего вещества может привести к уменьшению модельных погрешностей прогноза концентраций. Это было подтверждено проведенными экспериментальными расчетами.

Направления совершенствования системы прогнозирования загрязнения воздуха на основе химических транспортных моделей

Созданная в Гидрометцентре России технология прогнозирования загрязнения воздуха на основе химических транспортных моделей CHIMERE и COSMO-Ru7-ART позволяет рассчитывать поля концентрации загрязняющих веществ до 3 суток вперед с дискретностью 1 час. Регулярное тестирование модельных расчетов служит основой для определения путей развития и усовершенствования созданной системы в трех главных направлениях: развитие системы прогнозирования (1) – (4), см. ниже; расширение прогностических показателей качества воздуха (5); разработка алгоритма и методики расчета рисков с участием межведомственных специалистов (6).

1. *Увеличение горизонтального разрешения модельных расчетов до 2 км.* Сегодня подготовлена экспериментальная версия технологии и получены первые результаты расчетов ХТМ на модельной сетке 2 км для московского региона с усвоением оперативных метеорологических прогностических данных системы COSMO-Ru2.

2. *Коррекция эмиссий* за счет пространственного и количественного перераспределения выбросов отдельных веществ по секторам экономики, используя данные международных кадастров эмиссий, учета и усвоения данных инвентаризации региональных эмитентов.

3. *Оптимизация количества рассчитываемых ХТМ загрязняющих веществ.* В поисках оптимального решения путем численных экспериментов получено подтверждение, что уменьшение количества прогнозируемых ХТМ загрязняющих веществ сопровождается значительным сокращением времени счета без заметного ущерба качеству прогноза измеряемых на станциях мониторинга загрязняющих веществ.

4. *Расширения области расчета ХТМ.* Отлаженная на центральных областях и московском регионе технология предусматривает изменение границ расчетной области и определение трехмерного пространственного разрешения в соответствии с атмосферной моделью. Расширение расчетного домена нуждается в увеличении вычислительных ресурсов, сопровождается подготовительной работой по адаптации региональных эмиссий с привлечением данных сетевых измерений концентраций загрязняющих веществ.

5. *Коррекция систематических ошибок моделей.* Эффективность процедуры постпроцессинга по минимизации систематических ошибок моделей подтверждена серией экспериментальных расчетов, включая комплексирование прогнозов двух ХТМ.

6. *Прогнозирование индекса качества воздуха.* В зарубежной практике информация о качестве воздуха представляется общественности в виде описательных характеристик с указанием степени опасности для различающихся по возрасту и состоянию здоровья групп населения; качество воздуха определяется на основе величин концентрации загрязняющих веществ, но перечень приоритетных загрязнителей и количественные критерии характеристики качества воздуха формируются по национальным стандартам. Реализация аналогичной системы с применением расчетов ХТМ может существенно расширить номенклатуру прогностической продукции Росгидромета и повысить уровень представления информации о качестве воздуха.

7. *Прогнозирование рисков от неблагоприятного воздействия загрязнения воздуха.* Постановка научной задачи, связанной с оценками риска для здоровья, для Росгидромета является новой, вместе с тем она соответствует приоритетным направлениям Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации. Методологии оценки риска должны разрабатываться специалистами разного профиля (эпидемиологи, токсикологи, гигиенисты, химики, клиницисты, математики и др.); а затем включаться в алгоритм реализации поставленной задачи, что позволит получать актуальную прогностическую экологическую информацию.

В завершении отметим, что конечной целью выполняемых в Гидрометцентре России научных исследований и технологических разработок является практическая реализация системы численного прогнозирования качества воздуха для повышения осведомленности населения о качестве воздуха в доступной форме. Ярким примером практической ориентации и оперативной востребованности расчетов ХТМ является созданная в кратчайшие сроки авторами настоящей работы (А.А. Кирсанов, Г.С. Ривин) система прогнозирования переноса продуктов горения лесных пожаров в Сибири и на Дальнем Востоке летом 2019 г., обеспечившая выполнение поручений правительства России. Первую версию системы прогнозирования распространения дымовых шлейфов с применением модели COSMO-RuNA6-ARTfire планируется доработать до оперативного режима работы.

Список литературы

1. Блинков Д.В., Г.С. Ривин. Система краткосрочного негидростатического прогноза погоды COSMO-RU: технологическая линия // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 365. С. 142-162.
2. 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.
3. 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. Том. 6, № 4. С. 339-351.
4. Донченко В., Кунин Ю., Рузский А., Виженский В. Методы расчета выбросов от автотранспорта и результаты их применения // Журнал автомобильных инженеров. 2014. № 3. С. 44-51.
5. Кирсанов А. А., Кострова У. В., Ревокатова А. П., Ривин Г.С., Суркова Г.В. Прогноз концентраций загрязняющих веществ в атмосфере на основе системы COSMO-Ru-ART // Турбулентность, динамика атмосферы и климата. М. Физматкнига, 2018. С. 356-362.

6. Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Глазкова А.А., Захарова П.В., Лезина Е.А., Звягинцев А.М. Неблагоприятные для качества воздуха метеорологические факторы // Труды Гидрометцентра России. 2014. Вып. 351. С.154-172.
7. Нахаев М.И., Березин Е.В., Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Коновалов И.Б., Блинов Д.В. Прогнозирование концентраций загрязняющих веществ в атмосфере с применением химической транспортной модели CHIMERE и модели COSMO-Ru7 // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 357. С. 146-164.
8. Нахаев М.И., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю. Оперативные технологии прогноза показателей качества приземного воздуха // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 365. С. 71-80.
9. Ревактова А.П., Суркова Г.В., Кирсанов А.А., Кислов А.В., Ривин Г.С. Прогноз загрязнения атмосферы Московского региона с помощью модели COSMO-ART // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2012. № 4. С. 25–33.
10. Руководство ЕМЕП/ЕАОС по инвентаризации выбросов. http://ceip.at/ms/ceip_home1/ceip_home/reporting_instructions/
11. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М. и др. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. 2015. № 6. С. 58-70.
12. Ткачева Ю.В. Методика интерполяции кусочно-линейных данных об эмиссиях автотранспорта на регулярную модельную сетку // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2 (368). С. 170-180.
13. 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 // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 360. С. 149-167.
14. Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Коновалов И.Б., Захарова П.В. Прогнозирование метеорологических условий и загрязнения воздуха с применением данных численной модели атмосферы и химической транспортной модели // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 365. С. 81-93.
15. Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Кузнецова И.Н., Коновалов И.Б., Захарова П.В. Региональная адаптация базы данных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 3 (369). С. 33-45.
16. Baklanov A., Grimmond C.S.B., Carlson D., Terblanche D. et al. From urban meteorology, climate and environment research to integrated city services // Urban Climate. 2018. Vol. 23. P. 330-341. http://www.meteo.fr/icuc9/LongAbstracts/tukup4-1-4061232_a.pdf
17. Butler T.M., Lawrence M.G., Gurjar B.R., van Aardenne J. et al. The representation of emission from megacities in global emission inventories // Atmos. Environ. 2008. Vol. 42. P. 703-719.
18. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016. Technical guidance to prepare national emission inventories / EEA Report No 21/2016. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016. DOI:10.2800/247535.
19. Joint Report of COST Action 728 and GURME – Overview of Tools and Methods for Meteorological and Air Pollution Mesoscale Model Evaluation and User Training // WMO/TD- No. 1457. P. 121. https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo-td_1457.pdf.
20. Kim Y. Wu You, Seigneur C., Roustan Y. Multi-scale modeling of urban air pollution: development and application of a street-in-grid model (v1.0) by coupling Munich (v1.0) and polair3d (v1.8.1) // Geosci. Model Dev. 2018. Vol. 11. P. 611-629. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-611-2018>.
21. Korsholm U.S., Baklanov A., Gross A., Mahura A., Sass B.H., Kaas, E. Online coupled chemical weather forecasting based on HIRLAM – overview and prospective of Enviro-HIRLAM. // HIRLAM Newsletter. 2008. Vol. 54. P. 1-17.
22. Kukkonen J., Olsson T., Schultz D. M., et al. A review of operational, regional-scale, chemical weather forecasting models in Europe // Atmos. Chem. Phys. 2012. Vol. 12. P. 1-87.
23. Kumar P., Ketzel M., Vardoulakis S., Pirjola L., Britter R. Dynamics and dispersion modelling of nanoparticles from road traffic in the urban atmospheric environment – A review // J. Aerosol Science. 2011. Vol. 42, no. 9. P. 580-603.
24. Review of the capabilities of meteorological and chemistry-transport models for describing and predicting air pollution episodes // WMO/TD-No. 1502 2009. <https://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/documents>
25. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Vilfand R.M., Astakhova E.D. et al. COSMO-Ru: operational mesoscale numerical weather prediction system of the Hydrometcenter of Russia. Current status and recent developments // Res. Act. Atm. Ocean. Modell. 2018. Vol. 18, no. 15. P. 5.11-5.12.
26. Srimath S.T.G., Sokhi R., Karppinen A. et al. Evaluation of an urban modelling system against three measurement campaigns in London and Birmingham // Atm. Pollut. Res. 2017. Vol. 8, is. 1. P. 38-55.

27. Van der Gon D., Visschedijk A., Van der Brugh H., Droge R. High resolution European emission inventory for the years 2003-2007 // TNO-report. TNO-060-UT-2011-005882011. <https://gmes-atmosphere.eu/documents/deliverables/d-emis/>

28. Zhang Y. Online-coupled meteorology and chemistry models: history, current status and outlook // Atmos. Chem. Phys. 2008. Vol. 8, no. 11. P. 2895-2932.

References

1. Blinov D.V., Rivin G.S. The short-term non-hydrostatic mesoscale weather forecast system COSMO-Ru: The technological line. Trudy Gidromettsentra Rossii [*Proceedings of the Hydrometcentre of Russia*], 2017, vol. 365, pp. 142-162 [in Russ.].

2. 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.

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

4. Donchenko V., Kunin J., Ruzsky A., Vizhensky V. Methods for estimating emissions from vehicles and their application. *Zhurnal avtomobil'nyh inzhenerov [Zhurnal AAI]*, 2014, no. 3, pp. 44-51 [in Russ.].

5. Kirsanov A.A., Kostrova U.V., Revokatova A.P., Rivin G.S., Surkova G.V. Prognoz koncentracii zagryaznyayuschih veshchestv v atmosfere na osnove sistemy COSMO-Ru-ART. Turbulentnost', dinamika atmosfery i klimata. Moscow, Fizmatkniga, 2018, pp. 356-362 [in Russ.].

6. Kuznetsova I.N., Shalygina I.Yu., Nakhaev M.I., Glazkova A.A., Zakharova P.V., Lezina E.A., Zvyagintsev A.M. Meteorological factors unfavourable for air quality. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2014, vol. 351, pp. 154-172 [in Russ.].

7. Nakhayev M.I., Berezin E.V., Shalygina I.Yu., Kuznetsova I.N., Konovalov I.B., Blinov D.V. Prediction of pollutant concentrations in the atmosphere using the chemical transport model CHIMERE and the model COSMO-Ru7. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 357, pp. 146-164 [in Russ.].

8. Nahaev M.I., Kuznetsova I.N., Shalygina I.Yu. The operational technologies for forecasting ground air quality indicators. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 365, pp. 71-80 [in Russ.].

9. Revokatova A.P., Surkova G.V., Kirsanov A.A., Rivin G.S. Forecast of the atmosphere pollution in the Moscow region using the COSMO-ART model. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya [Moscow University Bulletin. Series 5. Geography]*, 2012, no. 4, pp. 25-33 [in Russ.].

10. Rukovodstvo EMEP/EAOS po inventarizacii vybrosov. Available at: http://ceip.at/ms/ceip_home/ceip_home/reporting_instructions/. [in Russ.].

11. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Vil'fand R.M., Alferov D.Yu., Astakhova E.D., Blino v D.V., Bundel' A.Yu., Kazakova E.V., Kirsanov A.A., Nikitin M.A., Perov V.L., Surkova G.V., Revokatova A.P., Shatunova M.V., Chumakov M.M. The COSMO-Ru system of nonhydrostatic mesoscale short-range weather forecasting of the Hydrometcenter of Russia: The second stage of implementation and development. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, vol. 40, no. 6, pp 400-410 DOI: 10.3103/S1068373915060060.

12. Tkacheva Ju.V. Methodology of interpolating piecewise linear data on vehicle emissions on a regular model grid. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2018, vol. 368, no. 2, pp. 170-180 [in Russ.].

13. 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, pp. 149-167 [in Russ.].

14. Shalygina I.Yu., Kuznetsova I.N., Nakhaev M.I., Konovalov I.B., Zaharova P.V. Forecasting of weather conditions and air pollution with application of data of the numerical model of the atmosphere and a chemical transport model. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 365, pp. 81-93 [in Russ.].

15. Shalygina I.Yu., Nakhaev M.I., Kuznetsova I.N., Konovalov I.B., Zaharova P.V. Regional adaptation of the database of pollutants emissions into the atmosphere. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2018, vol. 369, no. 3, pp. 33-45 [in Russ.].

16. Baklanov A., Grimmond C.S.B., Carlson D., Terblanche D. et al. From urban meteorology, climate and environment research to integrated city services. *Urban Climate*, 2018, vol. 23, pp. 330-341. Available at: http://www.meteo.fr/icuc9/LongAbstracts/tukup4-1-4061232_a.pdf

17. Butler T.M., Lawrence M.G., Gurjar B.R., van Aardenne J. et al. The representation of emission from megacities in global emission inventories. *Atmos. Environ.*, 2008, vol. 42, pp. 703-719.

18. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016. Technical guidance to prepare national emission inventories / EEA Report No 21/2016. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016. DOI:10.2800/247535.
19. Joint Report of COST Action 728 and GURME – Overview of Tools and Methods for Meteorological and Air Pollution Mesoscale Model Evaluation and User Training. WMO/TD- No. 1457, pp. 121. Available at: https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo-td_1457.pdf.
20. Kim Y, Wu You, Seigneur C., Roustan Y. Multi-scale modeling of urban air pollution: development and application of a street-in-grid model (v1.0) by coupling Munich (v1.0) and polair3d (v1.8.1). *Geosci. Model Dev.*, 2018, vol. 11, pp. 611-629. Available at: <https://doi.org/10.5194/gmd-11-611-2018>.
21. Korsholm U.S., Baklanov A., Gross A., Mahura A., Sass B.H., Kaas, E. Online coupled chemical weather forecasting based on HIRLAM – overview and prospective of Enviro-HIRLAM. HIRLAM Newsletter, 2008, vol. 54, pp. 1-17.
22. Kukkonen J., Olsson T., Schultz D.M. et al. A review of operational, regional-scale, chemical weather forecasting models in Europe. *Atmos. Chem. Phys.*, 2012, vol. 12, pp. 1-87.
23. Kumar P., Ketzel M., Vardoulakis S., Pirjola L., Britter R. Dynamics and dispersion modelling of nanoparticles from road traffic in the urban atmospheric environment – A review. *J. Aerosol Science*, 2011, vol. 42, no. 9, pp. 580-603.
24. Review of the capabilities of meteorological and chemistry-transport models for describing and predicting air pollution episodes. *WMO/TD-No. 1502*, 2009. Available at: <https://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/documents>
25. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Vilfand R.M., Astakhova E.D. et al. COSMO-Ru: operational mesoscale numerical weather prediction system of the Hydrometcenter of Russia. Current status and recent developments. *Res. Act. Atm. Ocean. Modell.*, 2018, vol. 18, no. 15, pp. 5.11-5.12.
26. Srimath S.T.G., Sokhi R., Karppinen A. et al. Evaluation of an urban modelling system against three measurement campaigns in London and Birmingham. *Atm. Pollut. Res.*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 38-55.
27. Van der Gon D., Visschedijk A., Van der Brugh H., Droge R. High resolution European emission inventory for the years 2003-2007. TNO-report. TNO-060-UT-2011-005882011. Available at: <https://gmes-atmosphere.eu/documents/deliverables/d-emis/>
28. Zhang Y. Online-coupled meteorology and chemistry models: history, current status and outlook. *Atmos. Chem. Phys.*, 2008, vol. 8, no. 11, pp. 2895-2932.

Поступила в редакцию 03.09.2019 г.

Received by the editor 03.09.2019.