

# ПРОГНОЗ КОНЦЕНТРАЦИИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ С ПОМОЩЬЮ ОБЪЕДИНЕННОЙ МОДЕЛИ COSMO-RU7-ART

*Г.В. Суркова<sup>1</sup>, А.А. Кирсанов<sup>2</sup>, А.В. Кислов<sup>1</sup>,  
А.П. Ревокатова<sup>2</sup>, Г.С. Ривин<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

<sup>2</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр

Российской Федерации

*galina.surkova@gmail.com, heu3becteh@mail.ru, avkislov@mail.ru,*

*revokatova@gmail.com, Gdaly.Rivin@mail.ru*

## Введение

Оценка современного состояния окружающей среды невозможна без характеристики загрязненности атмосферного воздуха. Термин «загрязненность» подразумевает опасную, вредную концентрацию атмосферных газов и аэрозолей, нарушающую естественные процессы здорового функционирования живых организмов.

Происхождение загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосфере может быть природным и антропогенным. Естественные причины роста концентраций ЗВ – извержения вулканов и дегазация мантии в вулканических районах, золотый подъем пыли, распространение пыльцы цветущих растений, эманация природных ядовитых или радиоактивных продуктов, химическая и физическая трансформация изначально безвредных веществ в атмосфере *in situ* и другие процессы. Антропогенные выбросы ЗВ и веществ-предшественников тех ЗВ, которые образуются непосредственно в атмосфере, наиболее активно происходят в районах с высокой плотностью населения, в промышленных районах различной специализации,

вдоль наземных, воздушных и морских транспортных путей, в результате сельскохозяйственной деятельности и т. п.

Отметим, что увеличение концентраций ЗВ любого происхождения в приземном слое атмосферы может происходить при неизменных эмиссиях ЗВ, но за счет их накопления в результате неблагоприятных синоптических ситуаций. Важное значение имеет учет влияния концентраций ЗВ не только на состав воздуха, но и на кислотность осадков. Большую роль, даже в отсутствии местных источников ЗВ, играет их перенос атмосферными течениями. Время жизни ЗВ в атмосфере контролируется химическими и физическими процессами. Современный уровень науки о химии атмосферы свидетельствует, что правильный количественный учет процессов выведения ЗВ из атмосферы возможен только с использованием метеорологических данных о температуре и влажности воздуха, ветре, осадках, освещенности и т. д.

В задачах оценки загрязненности атмосферы важным вопросом, наряду с диагнозом текущего состояния, является прогноз концентраций ЗВ. Характеристика текущей «химической погоды» и ее прогноз сейчас стоят в одном ряду с основными целями работы гидрометеорологических центров многих стран.

Прогноз концентраций атмосферных газов и примесей требует знания интенсивности их источников и стоков, а также скорости их химической и физической трансформации в атмосфере. Важнейшим шагом в этом направлении стало развитие объединенных расчетных комплексов, включающих метеорологическую атмосферную модель и химико-транспортную модель (ХТМ). Работа таких интегрированных моделей стала возможна, с одной стороны, благодаря огромной исследовательской работе в области химии атмосферы и численного моделирования метеорологических процессов, с другой стороны, благодаря скачку в развитии вычислительной техники.

Существует два основных подхода к объединению метеорологической и химико-транспортной моделей. Некоторые ХТМ «встроены» в численные модели прогноза погоды (так называемые «он-лайн» ХТМ), в них взаимодействие метеорологической и химической моделей осуществляется на каждом шаге по

времени. Другие ХТМ, так называемые «офф-лайн» модели, могут работать автономно от метеорологических моделей. В них метеорологические данные задаются как начальные условия и либо не обновляются в процессе счета, либо обновляются с определенным шагом по времени.

В «он-лайн» модельных системах метеорологические поля (ветер, температура, влажность и т.д.) доступны для расчетов в химической модели на каждом временном шаге. Кроме того, изменение расчетных концентраций газов и аэрозолей на каждом шаге по времени оказывает обратное влияние на метеорологические расчеты, в частности на оценку переноса радиации, облакообразование и т.д. Представляемая в данной статье объединенная модель COSMO-Ru7-ART относится именно к такому классу моделей.

К современным расчетным комплексам, объединяющим метеорологическую и химическую модели, относятся MM5/chemistry [28], WRF/Chem [27], Enviro-HIRLAM [22, 33], COSMO-ART [45], BOLCHEM [35]. Подробное описание текущего состояния в области моделирования мезомасштабных атмосферных процессов с использованием химико-транспортных моделей представлено в [30].

В Гидрометцентре России разработка инструмента прогноза концентраций загрязняющих веществ ведется с двумя объединенными моделями – WRF ARW–CHIMERE [6, 8, 32] и COSMO-Ru7-ART [12, 13, 14, 16]. В настоящее время модели работают в экспериментальном режиме и применяются для Московского региона и Центрального федерального округа (ЦФО) для прогноза концентраций озона, окислов азота, мелкодисперсного аэрозоля и других веществ.

## **1. Методы**

### **1.1. Объединенная модель COSMO-Ru7-ART**

Объединенная модель COSMO-Ru7-ART – синтез мезомасштабной негидростатической метеорологической модели COSMO-Ru (COnsortium for Small-scale MOdelling – RUssia)

[2, 15, 23] и модели атмосферной химии ART (Aerosols and Reactive Trace gases) [44, 31]. В названии российского варианта объединенной модели вставка «Ru7» в начальное название COSMO-ART подразумевает, что используется версия мезометеорологической модели COSMO, адаптированная для России, с пространственным разрешением 7 км.

Гидрометцентр России – член консорциума COSMO с правом использования модели COSMO для всех прогностических задач. С апреля 2011 года система мезомасштабного прогноза погоды COSMO-Ru7 по решению Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиофизическим прогнозам Росгидромета от 13 апреля 2011 г. внедрена в оперативную практику в качестве базовой для численного прогнозирования следующих метеорологических величин (полей и метеограмм): осадки, температура и влажность воздуха, фоновый приземный ветер. COSMO-ART разработана в Германии и передана Росгидромету как участнику консорциума COSMO для внедрения и эксплуатации. В Гидрометцентре России российская версия COSMO-Ru7-ART адаптирована к вычислительной системе SGI Altix-4700 [14].

Разработка COSMO-ART начиналась с объединения метеорологической модели KAMM [20] и дисперсионной модели DRAIS [36]. Дополненная аэрозольной схемой и блоком описания пылицы, модель KAMM/DRAIS/MADEsoot/dust [37, 43] работала до начала 2000 г. Затем метеорологический блок этой модели был заменен оперативной моделью Немецкой службы погоды (DWD) Lokal Modell [38]. Новая модель получила название LM-ART. В 2006 году официальное название метеорологической модели было изменено на COSMO (COnsortium for Small-scale MOdelling), а объединенная модель стала называться COSMO-ART [45]. Далее в настоящей работе рассматриваются результаты версии COSMO-Ru7-ART.

Как и система прогноза погоды COSMO-Ru7, COSMO-Ru7-ART использует сферическую систему координат со смещенным полюсом и имеет то же пространственное разрешение – 7 км между узлами сетки по горизонтали, 40 вертикальных уровней.

Важная особенность COSMO-Ru7-ART – совместный расчет метеорологических величин и химических преобразований на каждом шаге по времени, что позволяет учитывать обратное влияние аэрозолей и газов на радиационный и метеорологический режим атмосферы.

COSMO-Ru7-ART позволяет учитывать химические преобразования веществ в газовой фазе, фотодиссоциацию, коагуляцию, конденсацию, нуклеацию, осаждение, выведение и вымывание аэрозолей. Предусмотрен учет аэрозольной химии, взаимодействия аэрозолей с радиацией, эмиссии морской соли, минеральной пыли, пыльцы, биогенные выбросы гидрокарбонатов и гетерогенные реакции. Химические процессы в тропосфере представлены 172 реакциями. Среди неорганических соединений в явном виде рассматриваются 17 стабильных соединений и 4 радикала. Органические соединения включают 26 стабильных соединений и 16 радикалов.

Основой расчета в COSMO-Ru7-ART пространственных и временных изменений концентраций малых газовых примесей служит трехмерное уравнение диффузии. Его граничными условиями являются данные о выбросах газовых примесей. Расчет газофазных химических реакций производится в блоке RADMKA, который основан на модели RADM [39].

Для учета процессов фотодиссоциации в COSMO-ART используется модель фотолиза PAPA, позволяющая рассчитывать вертикальные профили частоты фотодиссоциации путем ввода коррекции стандартных профилей с учетом дополнительных факторов, рассчитываемых на каждом шаге модельного счета.

Кроме пространственно-временных изменений малых газовых примесей в COSMO-ART с использованием модели MADESoot [19] и ряда параметризаций учитываются физические и химические трансформации аэрозолей, разделенных в зависимости от размера и химического состава на 6 групп.

Для работы химического блока COSMO-Ru7-ART помимо метеорологических показателей, рассчитываемых COSMO-Ru7, используются следующие входные данные. Распределение землепользования основано на оценках проекта Global Land Cover

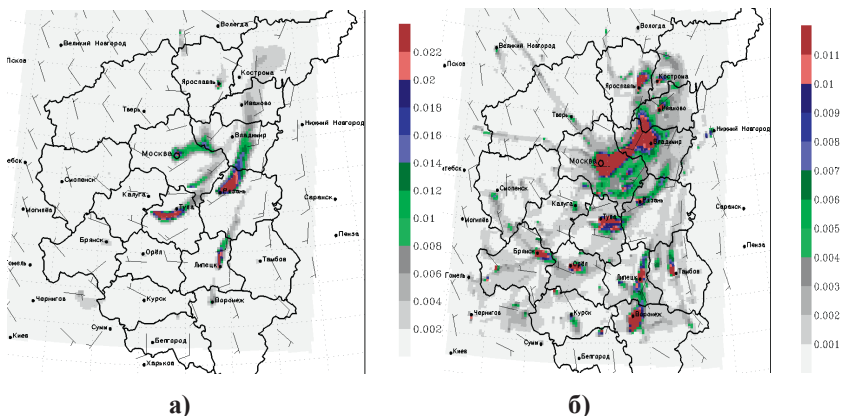
2000 Project (GLC, 2000) [29]. В качестве данных о выбросах веществ используются результаты проекта TNO (Netherlands) [26, 34], горизонтальный шаг сетки примерно 8 км ( $0,125 \times 0,0625^\circ$ ), временное разрешение 1 час. С учетом полноты природных и антропогенных источников, учитываемых в инвентаризации эмиссий TNO, а также подробности описания временной эволюции количества выбросов (в том числе суточного хода в рабочие/выходные дни и сезонного хода) – это одна из самых подробных баз данных по выбросам в Европе [41, 42]. Тем не менее, как будет обсуждаться далее, значения эмиссий ЗВ по данным TNO для московского мегаполиса требуют коррекции. Авторами далее описан предлагаемый метод расчета эмиссий ЗВ в Москве по оперативным данным измерений концентраций ЗВ и результаты его применения для угарного газа.

С декабря 2011 г. модель COSMO-Ru7-ART работает в квази-оперативном режиме. Ежедневно в 10 часов по московскому времени автоматически запускается расчет прогноза от 00 ч ВСВ на 48 часов. После окончания счета запускается постпроцессинг: прогностическая информация о концентрациях веществ извлекается из grb-файлов, выполняется визуализации результатов. При нормальной работе системы карты пространственно-временного распределения веществ на ближайшие 2 суток доступны в 13 часов по московскому времени.

В настоящий момент квази-оперативная версия модели COSMO-Ru7-ART работает для территории ЦФО с расстоянием между узлами сетки  $7 \times 7$  км. Для большинства исследовательских задач, в том числе для нашего исследования [12, 13], результаты которого обсуждаются далее, модель интегрировалась по территории Московской области или ЦФО.

Программный комплекс для оперативной визуализации ежедневного прогноза концентрации загрязняющих веществ разработан авторами на базе пакета GRaDS, примеры приведены на рис. 1. Модель COSMO-Ru7-ART осуществляет прогноз концентрации CO, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, NO и NO<sub>2</sub> и других ЗВ. Качественная оценка показывает, что распространение шлейфа загрязняющих веществ от источника (самый крупный антропогенный источник

всех загрязняющих веществ – Москва) происходит в соответствии с синоптической ситуацией (в частности, с направлением ветра). Количественные оценки обсуждаются далее.



**Рис. 1. Примеры ежедневного прогноза концентрации SO<sub>2</sub> (а), NO (б), ppm.**

## 1.2. Качество прогнозов

Наиболее подробно результаты верификации COSMO-ART для Европы представлены в [31]. Для российской версии COSMO-Ru7-ART верификация была проведена, и эти работы продолжаются, результаты первого этапа представлены в [9].

Оценка качества прогностических расчетов для ЗВ в Гидрометцентре России организована следующим образом. Результаты ежедневных численных экспериментов COSMO-Ru7-ART автоматически собираются в архив. Дальнейшая оценка качества моделирования выполняется путем сравнения с данными наблюдений на автоматических станциях контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) в Москве и Московской области, любезно предоставленными ГПБУ «Мосэкомониторинг». Сравнение результатов прогноза проводится совместно с лабораторией

метеорологических условий загрязнения и радиационного мониторинга Гидрометцентра России. На сегодняшний день выполнена оценка способности модели воспроизводить среднесуточные и максимальные значения концентраций отдельно в теплый и холодный периоды года.

Сравнение прогнозов COSMO-Ru7-ART средней суточной концентрации  $\text{NO}_2$  с.с. с данными измерений показало незначительное завышение модельных прогнозов. На пригородных станциях и на станциях, расположенных на юго-востоке города (Косино, Вешняки, Кожухово), модель занижает  $\text{NO}_2$  с.с., при этом величина ошибок не превышает  $10 \text{ мкг/м}^3$ . На пригородных территориях модель COSMO-Ru7-ART и весной, и летом занижает концентрации  $\text{NO}_2$  с.с. На отдельных городских станциях также отмечается занижение концентраций (Кожухово, Нижняя Масловка).

По результатам оценки прогнозов модели COSMO-Ru7-ART, в теплый период года в среднем по городу максимальные концентрации  $\text{O}_3$  занижаются весной на  $30 \text{ мкг/м}^3$ , летом – примерно на  $10\text{--}15 \text{ мкг/м}^3$ .

Оценка прогнозов COSMO-Ru7-ART средней суточной концентрации CO показала существенное превышение модельных расчетов практически для всех станций, за исключением фоновых территорий (Зеленоград и Звенигород). В среднем концентрации были превышены в 3–6 раз, в отдельных случаях расчетная величина CO была на порядок больше наблюдаемой. Величина ошибки при этом составляла  $1500\text{--}2000 \text{ мкг/м}^3$ , максимальные отклонения достигали  $6000\text{--}7000 \text{ мкг/м}^3$ . В теплый период прогнозы COSMO-Ru7-ART также завышают уровень CO, но уже значительно меньше, чем в холодный период: на большинстве станций величина превышения составляет менее  $300 \text{ мкг/м}^3$ .

В результате проведенной верификации установлены характерные диапазоны модельных ошибок прогнозов концентраций на типовых станциях (городского типа и примагистральные) в разных секторах города (север, центр, восток и юго-восток, запад и юго-запад) для каждого вещества: CO,  $\text{PM}_{10}$ , NO,  $\text{NO}_2$  и  $\text{O}_3$ .

Выявлено преобладающее завышение уровней концентрации COSMO-Ru7-ART (наибольшее зимой), за исключением



занижений  $PM_{10}$  в теплый период года и суточного максимума приземного озона. Модельные ошибки этой ХТМ меньше на магистральных станциях и в юго-восточном секторе города.

В результате подробной верификации были предложены методики коррекции модельных прогнозов с помощью введения поправочных коэффициентов. В частности, поправки вводились к прогнозу концентрации угарного газа. Для каждой станции АСКЗА были рассчитаны индивидуальные поправочные коэффициенты по соотношению «измерение – модель». После применения диагностической коррекции ошибки расчетов COSMO-Ru7-ART концентраций CO существенно снизились. Подробно этот метод и результаты его применения описываются далее в статье.

Проведенная верификация помогает оценить степень достоверности модельных результатов, разработать методы корректировки прогноза, выявить основные причины ошибок. Исследования качества модельных данных продолжается. Помимо концентрации загрязняющих веществ оценивается качество воспроизведения моделью метеорологических данных, которые оказывают значительное влияние на результат прогноза.

### **1.3. Расчет актуальных эмиссий угарного газа для уточнения прогноза загрязнения на территории Москвы и Московской области**

Выше было отмечено, что COSMO-Ru7-ART значительно завышает прогностические концентрации угарного газа на территории Московского мегаполиса. Это связано, в первую очередь, с преувеличением эмиссий CO по данным TNO. Неточности в оценке эмиссий связаны с тем, что на отдельном сегменте городской территории невозможно измерить выбросы загрязняющих веществ и оценить суммарную мощность источников, а ведь именно в городе необходим контроль концентрации такого токсичного газа, как CO, большая часть которого в Москве поступает от автомобильного транспорта. В связи с этим велика временная и пространственная изменчивость эмиссий CO.

Недостаточная точность имеющихся данных об эмиссиях и необходимость задания актуальных значений выбросов для

прогноза способствовали разработке метода расчета эмиссий угарного газа на основании данных о его фактической концентрации.

Основой предлагаемого алгоритма расчета эмиссий загрязняющих веществ стал известный подход, применявшийся неоднократно в тех случаях, когда функция источника по каким-либо причинам неизвестна. В этом случае мощность источника определяется по измеренным значениям на предыдущих шагах по времени. При этом притоки и расходы вещества, которое имеет концентрацию  $C$ , мг/м<sup>3</sup>, можно описать уравнением баланса массы:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \chi \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \chi \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial C}{\partial z} + E, \quad (1)$$

где  $\chi$  и  $k$  – горизонтальный и вертикальный коэффициенты турбулентной диффузии;  $E$  характеризует появление и потери вещества в результате химических реакций;  $u$ ,  $v$ ,  $w$  – составляющие вектора скорости ветра.

Проинтегрируем уравнение (1) по вертикали в пределах высоты  $H$  и объединим в левой части все слагаемые, учитывающие перенос по вертикали.

Учитывая, что в задаче о загрязнении атмосферы эмиссия вещества осуществляется именно с поверхности, будем считать, что потоки на уровне  $H$  малы по сравнению с потоками на уровне 0, совокупность которых и определяет эмиссию. Если скорость изменения концентрации из-за химических превращений гораздо меньше скорости изменения концентрации за счет метеорологических процессов, то последним слагаемым можно пренебречь. Будем рассматривать именно данный случай. Таким образом, эмиссия  $F$  может быть рассчитана по следующей формуле:

$$F = H \left( \frac{\partial \tilde{C}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{C} \tilde{u}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{C} \tilde{v}}{\partial y} - \tilde{C} \left( \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{v}}{\partial y} + \frac{\partial \tilde{w}}{\partial z} \right) - \chi \nabla^2 \tilde{C} \right), \quad (2)$$

где  $\nabla^2$  – плоский оператор Лапласа;  $\tilde{C}$  – средняя по слою концентрация угарного газа.

Формула (2) включает величины, которые определяются по данным измерений или вычисляются в соответствующих блоках атмосферной динамической модели (в данной работе – COSMO-Ru7).

Условие малости скорости изменения концентрации из-за химических превращений по сравнению со скоростью изменения концентрации за счет метеорологических процессов применимо в реальной атмосфере к угарному газу, среднее время жизни которого в атмосфере составляет 1–3 мес.

Изменение концентрации CO во времени будем аппроксимировать разностью концентраций в последовательные моменты времени:

$$\frac{\partial \tilde{C}}{\partial t} = \left( \frac{\tilde{C}_{i,j}^{k+1} - \tilde{C}_{i,j}^k}{\Delta t} \right), \quad (3)$$

где  $k$  – шаг по времени;  $i$  и  $j$  – пространственные координаты [12, 13].

Практическая реализация расчетов эмиссий угарного газа осуществлена путем использования результатов численных расчетов по мезомасштабной модели COSMO-Ru7 и данных о концентрации CO на 21 станции на территории Москвы и Московской области, предоставляемых по измерениям на автоматизированной сети контроля загрязнения атмосферы ГПБУ «Мосэкомониторинг».

Эмиссии угарного газа были рассчитаны по формуле (2) для разных периодов года. Расчетные периоды выбирались исходя из синоптических ситуаций. Мы старались охватить наиболее разнообразные метеорологические условия – антициклональный период, прохождение атмосферных фронтов, условия сильного ветра, наличие температурных инверсий.

Эмиссии, рассчитанные на основании концентраций, были сопоставлены с данными TNO. В целом средние и максимальные значения рассчитанных эмиссий получили хорошее согласование с данными этой базы выбросов. Сравнивая значения актуальных эмиссий с данными TNO, мы хотели получить подтверждение

адекватности рассчитанных нами значений выбросов, в чем мы и убедились.

Для реализации оперативного прогноза пространственно-временного распределения угарного газа необходимо знать распределение и мощность его источников с достаточным разрешением на период прогноза. Такая информация отсутствует и не существует возможности ее получения для условий мегаполиса. Поэтому было предложено при прогнозе на сутки использовать эмиссии, рассчитанные по данным предыдущего дня. При этом предполагается, что в течение следующих суток сохраняется та же структура выбросов. В случае переноса значений эмиссий на следующий день нужно учитывать недельный ритм большого города: эмиссии, рассчитанные по данным пятницы, не корректно переносить на субботу, так же как выбросы в воскресенье некорректно использовать для прогноза в понедельник. Таким образом, предлагаемая схема может оперативно работать для прогноза концентрации в следующие дни недели: вторник, среда, четверг, пятница. Именно для таких временных периодов и производились расчеты.

Каждый раз модель COSMO-Ru7-ART запускалась на счет на 24 часа от 00 ч ВСВ. При этом для каждого дня производилось два варианта расчетов с разными данными об эмиссиях CO. В первом варианте использовались данные инвентаризации выбросов TNO, при втором – актуальные эмиссии. Таким образом, в Москве и ближайшем Подмосковье (Зеленоград, Сходня, Долгопрудный) производилась замена данных об эмиссиях TNO данными об актуальных выброса. На остальной территории Московской области, где отсутствовали данные о концентрациях и, соответственно, было невозможно рассчитать эмиссии, использовались прежние данные TNO. Такой подход в неурбанизированном Подмосковье должен давать адекватные результаты, так как в отсутствии большего количества антропогенных источников выбросов CO средние многолетние данные, подготавливаемые TNO, отражают картину довольно правдоподобно. На рис. 2 приведена схема алгоритма прогноза концентрации CO с использованием актуальных эмиссий и эмиссий TNO [12, 13].

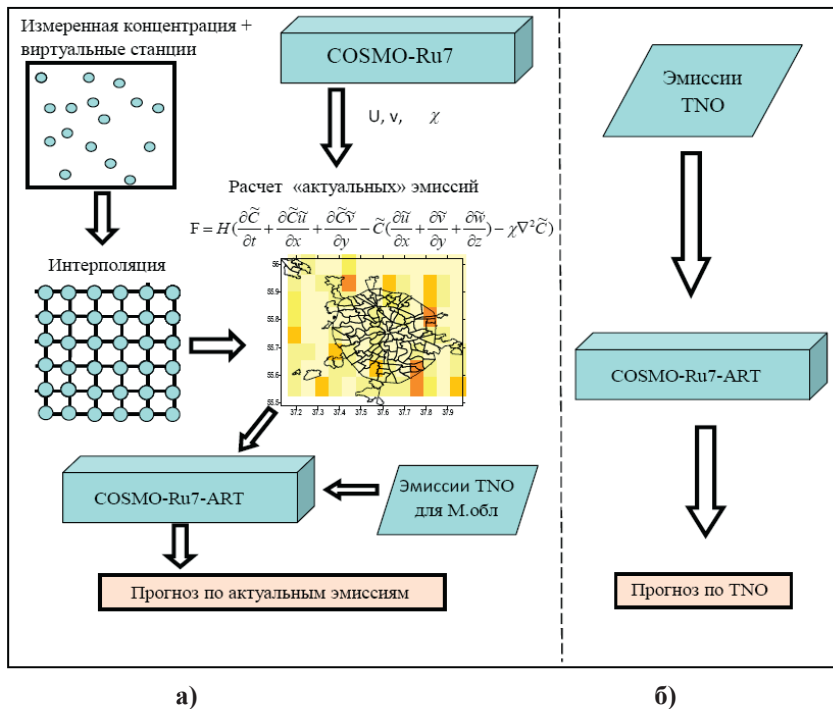


Рис. 2. Схема прогноза концентрации CO с использованием актуальных эмиссий (а) и эмиссий ТНО (б)

#### 1.4. Расчет переноса загрязняющих веществ от пожаров

Помимо квази-оперативного прогноза распределения загрязняющих веществ по территории Центрального федерального округа, COSMO-Ru7-ART применяется для прогноза распространения шлейфов от природных пожаров.

Математическое моделирование пожаров не может их предотвратить, но должно помогать в оценке последствий и служить основанием для принятия мер по предотвращению пожаров и минимизации ущерба от них. Лесные пожары значительно изменяют состав воздушной среды, могут нанести значительный ущерб природе, здоровью людей и объектам хозяйственной деятельности.

Ежегодно от лесных пожаров страдают многочисленные регионы России. Внимание к проблеме лесных пожаров на Европейской территории России особенно обострилось после событий 2010 года: погибли более 50 человек, огонь уничтожил более 2500 домов, площадь пожаров превысила 800 тысяч гектаров. Продолжительная задымленность атмосферы на фоне жаркой антициклональной погоды крайне негативно сказалась на здоровье многих людей.

Прогнозирование распространения шлейфов воздушных загрязнений от очагов лесных пожаров может помочь заблаговременно оповестить население и принять соответствующие меры при значительных превышениях предельно допустимых концентраций.

Лесные пожары с точки зрения лесной пирологии описаны во многих работах [1, 3, 4, 7, 10, 17, 18]. Пожар распространяется за счет передачи выделившегося во фронте пожара тепла путем конвекции, кондукции и переноса горящих частиц к свежей порции органической массы, в результате чего происходят ее нагрев, сушка и пиролиз. Летучие и конденсированные продукты пиролиза сгорают, что вызывает перемещение фронта пожара с выделением тепла, и процесс повторяется в указанном порядке до тех пор, пока в зоне пожара не выгорит весь запас органической массы.

Эмиссии при горении растительности включают  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CH}_4$  и неметановые углеводороды, а также неорганические и органические твердые частицы. Количество и тип выбросов при горении биомассы зависит не только от типа растительности, но и от ее влагосодержания, температуры окружающей среды, влажности и скорости ветра. Оценки глобальных выбросов малых газовых составляющих от горения биомассы можно найти, например, в [40].

Для расчета выбросов от горения биомассы используется информация по расходу горючего материала, которая зависит от площади выгоревшей территории, количества горючих материалов на единицу площади, а также характеристик и состояния горючих материалов. Количество горючего материала, в действительности сгоревшего в пожаре, будет зависеть от запаса и состояния топлива, его типа, климатических и метеорологических факторов, а

также интенсивности пожара. Различные эмпирические модели разработаны для оценивания расхода горючих материалов [24] и их влияния на атмосферные процессы [5].

Общая методология расчета массы выбросов в атмосферу от пожара может быть выражена следующим образом:

$$T = S \cdot t,$$
$$t = \sum_i (M_i \cdot f_i),$$
$$E = T \cdot \varphi.$$

Здесь  $T$  – общая масса выгоревших горючих материалов, т;  $S$  – площадь выгоревшей территории, км<sup>2</sup>;  $t$  – масса выгоревшего материала на единицу площади, т/км<sup>2</sup>;  $M_i$  – масса горючего материала типа  $i$  на единицу площади, т/км<sup>2</sup>;  $f_i$  – доля сгорания горючего материала типа  $i$ ;  $E$  – общая масса выброса, т;  $\varphi$  – фактор эмиссии, кг/т. Фактор эмиссии зависит от относительного преобладания горения и тления, которое определяется типом горючего материала и другими факторами.

Для задания фактора эмиссии в нашей работе за основу взяты данные, собранные по многочисленным источникам в [21]. Биомасса горящего типа растительности в районах пожара определялась для смешанного леса (30 кг/м<sup>2</sup>).

Были определены часовые эмиссии CO, NO, SO<sub>2</sub> для полностью сгоревшей территории модельной ячейки (7×7=49 км<sup>2</sup>) с предположением, что биомасса выгорает полностью за 24 часа. Для определения местоположения, площади распространения и продолжительности лесных пожаров была использована информация Министерства по чрезвычайным ситуациям и выбраны три наиболее обширные территории, пострадавшие от лесных пожаров с 03.08 по 10.08.2010 г. В этих районах в узлах сетки, ближайших к эпицентрам пожаров, были заданы источники выброса CO, NO, SO<sub>2</sub>. Выброс загрязняющих веществ задавался с одинаковой интенсивностью в течение всех дней, за которые осуществлялось моделирование. Общая площадь предполагаемой выгоревшей территории равна 147 км<sup>2</sup>. Выбросы меньших по площади очагов возгорания не задавались.

Прогноз рассчитывался на трое суток вперед, начиная с 00 ч ВСВ каждого дня периода 6–10 августа 2010 г. Было проведено пять серий расчетов. Полученные результаты моделирования были совмещены путем выборки вторых суток прогноза каждого из пяти экспериментов. Во вторые сутки влияние начальных условий на результат моделирования ослабевает, осуществляется перенос выбросов от источников на значительные расстояния, что делает поля концентраций загрязняющих веществ приближенными к реальным [16].

## **2. Результаты**

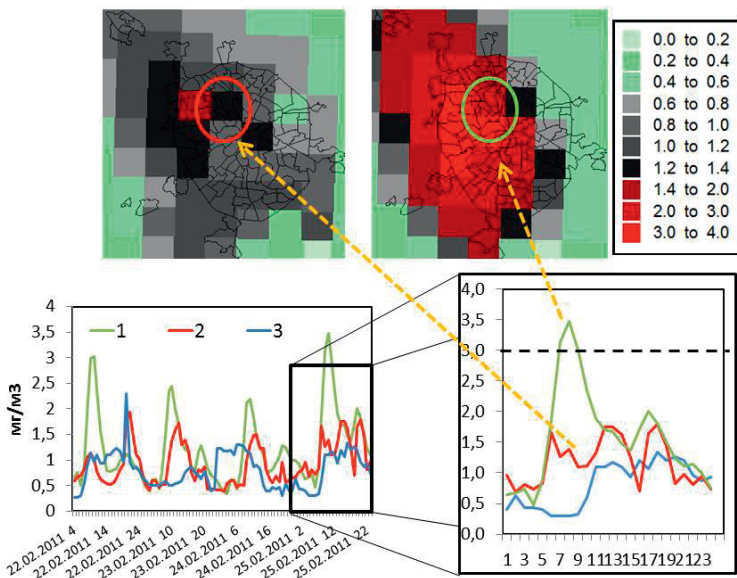
В разделе представлены результаты реализации двух методик, разработанных авторами и реализованных в Гидрометцентре России для усовершенствования качества прогноза загрязняющих веществ в атмосфере мегаполиса объединенной моделью COSMO-Ru7-ART.

### **2.1. Расчет актуальных эмиссий угарного газа для прогноза загрязнения на территории Москвы и Московской области**

В соответствии с методикой перерасчета эмиссий CO, описанной в разделе 1.3, численные эксперименты выполнялись для ЦФО. На рис. 3 показано пространственное распределение концентрации CO в 8 ч 25 февраля 2011 г. и особенности суточного хода концентрации в районе станции «МАДИ» в рассматриваемый период. Синоптическая ситуация во время расчетного периода практически не менялась, поэтому основным фактором изменений концентрации угарного газа в воздухе была эмиссия. Из графика видно, что использование данных ТНО приводит к систематическому завышению прогнозируемой концентрации по сравнению с фактической по данным АСКЗА. В суточном ходе проявляются 2 максимума: в 9 ч – от 2 до 3 мг/м<sup>3</sup>; в 20 ч – около 1,5 мг/м<sup>3</sup>. Столь высокие модельные результаты не согласуются с данными измерений. При использовании актуальных эмиссий модель показывает очень хорошее согласование с измеренными



концентрациями. Исключение – 23 февраля. В этот день модель зависила концентрации угарного газа. Это связано с тем, что для расчетов 23 февраля использовались эмиссии, рассчитанные на основании концентрации 22 февраля, а так как 23 февраля – выходной день, реальные выбросы СО были несколько ниже. Таким образом, подтверждается сделанное выше заключение о том, что перенос эмиссии на последующие сутки должен выполняться с учетом выходных дней.



**Рис. 3. Пространственное распределение концентрации СО в 8 ч 25 февраля (сверху) и особенности суточного хода концентрации СО в районе станции МАДИ в рассматриваемый период по данным прогноза на 1 сутки, осуществленного моделью COSMO-Ru7-ART с использованием эмиссий TNO (1 – зеленый цвет), актуальных эмиссий (2 –красный цвет), (3 – синий цвет) – данные наблюдений - - - ПДКс.с., 3,0 мг/м<sup>3</sup>.**

Для 25 февраля отмечалось превышение ПДКс.с. в 8 ч при использовании для прогноза данных TNO. Резкий рост

концентрации связан как с увеличением выбросов, так и со «сносом» высоких значений эмиссий из центра города. Видно (рис. 3), что использование актуальных эмиссий позволяет уменьшить ошибки прогноза и избежать ложной тревоги в связи с превышением ПДКс.с.

Дополнительно проводилось сравнение статистических характеристик (максимального, минимального, среднего значений, квантилей 0,25 и 0,75) пространственного распределения концентрации СО для нескольких дней по модельным результатам (с разными видами эмиссий) и по данным наблюдений.

Было показано, что при использовании данных ТНО, максимумы сильно завышены по сравнению с данными наблюдений, в то время как при прогнозе на основе актуальных эмиссий, этот разрыв заметно сокращается.

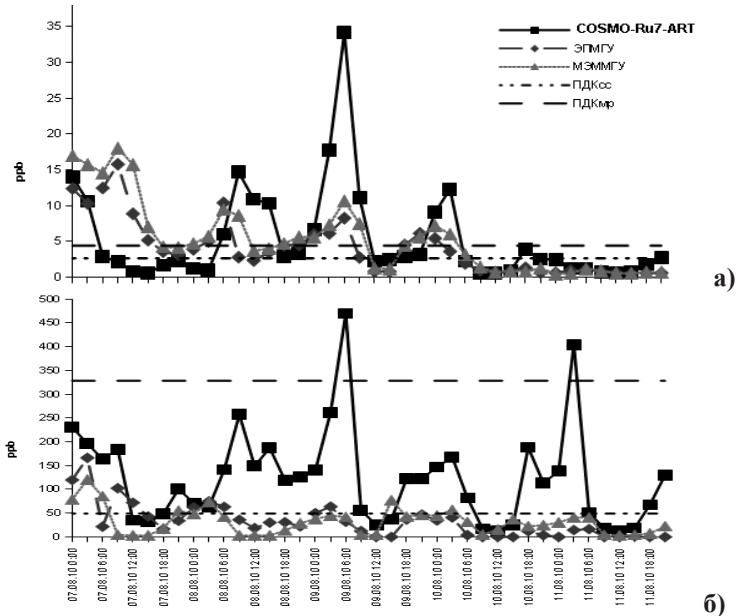
Средние значения концентраций так же воспроизводятся моделью значительно лучше при использовании эмиссий, рассчитанных на основании метеорологической информации и данных о концентрации. Таким образом, предложенный метод расчета эмиссий угарного газа позволяет получить более достоверную информацию о мощности его источников и улучшить качество прогнозов концентрации СО [12, 13].

## **2.2. Перенос загрязняющих веществ от пожаров**

Для оценки достоверности результатов моделирования, полученные данные были сопоставлены с данными наблюдений экологической станции ИФА РАН и Географического факультета МГУ (экологический павильон МГУ, ЭП МГУ), а также станции "МГУ" ГПБУ «Мосэкомониторинг» (далее МЭМ МГУ). Датчики измерений размещены рядом на территории Метеорологической обсерватории МГУ. На рис. 4 сопоставляются концентрации некоторых загрязняющих веществ по данным моделирования COSMO-Ru7-ART, по данным измерений ЭП МГУ и МЭМ МГУ, а также ПДК среднесуточные и ПДК максимальные разовые для соответствующих соединений.

Рассчитанные и измеренные значения концентраций оксида углерода в целом близки, максимумы концентраций соотносятся с

измеренными максимумами. Завышены по сравнению с измеренными значения, рассчитанные моделью на срок 06 ч ВСВ 9.08.2010 г. Данные измерений на станциях ЭП МГУ и МЭМ МГУ близки по значениям.



**Рис. 4. Прогностические и наблюдаемые концентрации CO (а) и NO (б).**

Максимум в рассчитанных моделью концентрациях в этот срок, значительно превышающий измеренные значения, проявляется для всех рассматриваемых загрязняющих веществ. Вероятно, в этот срок сказывается совокупное влияние заданного пожарного источника (рассматриваемая точка находится близко к оси факела распространения загрязняющих веществ от пожарного источника, где можно ожидать максимальных значений концентраций), городского источника Москвы и метеорологических условий на значения концентраций. Поскольку максимумы измеренных значений концентрации угарного газа в основном приходятся на

утренние часы, можно предположить значительное влияние суточной изменчивости с накоплением примесей в ночные часы, но различия в уровнях концентраций, а также отсутствие четко выраженного суточного хода 11.08.10 г. показывают, что также значительную роль играет характер переноса. Подобные рассуждения применимы и для результатов моделирования. Можно утверждать, что удалось добиться удовлетворительного воспроизведения значений концентраций угарного газа в данном эксперименте.

Проверка полученных результатов свидетельствует о способности модели рассчитывать реалистичные значения концентраций загрязняющих веществ в приземном слое. В пользу рассматриваемого подхода говорит также возможность оперативного его применения, так как подготовка численных экспериментов не требует длительного времени и не зависит от дополнительных источников, например, данных спутникового зондирования (но не исключает возможности их использования). Методика расчета выброса в атмосферу загрязняющих веществ при лесных пожарах, предназначенная для корректировки входных данных при моделировании распространения атмосферных примесей, применена для случаев пожаров в центре ЕТР в августе 2010 года [16].

### **Заключение**

Возможности объединенной модели COSMO-Ru7-ART не ограничены прогнозом концентрации загрязняющих веществ и распространения продуктов выбросов от пожаров. С помощью этой модели можно прогнозировать даты начала и окончания сезона пыльцы, ее эмиссии и перенос, что важно для страдающих от аллергии людей. Это направление использования модели в Гидрометцентре России находится в стадии разработки в связи с техническими проблемами переноса модели на другую вычислительную платформу. Объединенная модель COSMO-Ru7-ART может быть использована для прогноза и диагноза развития техногенных катастроф, связанных с выбросами в атмосферу опасных веществ, а также для прогноза перемещения облаков

вулканических выбросов, которые представляют собой серьезную опасность для населения, различных отраслей промышленности и транспорта.

Работа была частично поддержана грантом РГО ДОГОВОР №12/2013/РГО-РФФИ.

### Список использованных источников

1. Валендик Э.Н., Матвеев П.М., Софронов М.А. Крупные лесные пожары. – М.: Наука, 1979. – 198 с.

2. Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Система COSMO-RU негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: первый этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 8. – С. 6–20.

3. Гришин А.М. Физика лесных пожаров. – Томск: Изд-во ТГУ, 1994. – 218 с.

4. Доррер Г.А. Математические модели динамики лесных пожаров. – М.: Лесн. пром-сть, 1979. – С. 99–125.

5. Дубровская О.А. Численное моделирование влияния дымовых аэрозолей от лесных пожаров на процессы в атмосфере: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. – Новосибирск, 2008.

6. Зарипов Р.Б., Коновалов И.Б., Кузнецова И.Н., Беликов И.Б., Звягинцев А.М. Использование моделей WRF-ARW и CHIMERE для численного прогноза концентрации приземного озона // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 4. – С. 48–60.

7. Конев Э.В. Физические основы горения растительных материалов. – Новосибирск: Наука, 1977. – 239 с.

8. Кузнецова И.Н., Зарипов Р.Б., Коновалов И.Б., Звягинцев А.М., Семутникова Е.Г., Артамонова А.А. Вычислительный комплекс «модель атмосферы – химическая транспортная модель» как модуль системы оценки качества воздуха // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 23, № 6. – С. 485–492.

9. Кузнецова И.Н., Шальгина И.Ю., Нахаев М.И., Глазкова А.А., Зарипов Р.Б., Суркова Г.В., Ривин Г.С., Ревокатова А.П., Кирсанов А.А., Коновалов И.Б., Захарова П.В. Опыт прогнозирования загрязнения приземного воздуха в Московском регионе на основе данных химических транспортных моделей: результаты тестирования, проблемы, перспективы // Загрязнение атмосферы городов: труды науч.-практ. конф. – СПб: ГГО им. А.И. Воейкова, 2013. – С. 79–81.

10. Курбатский Н.П., Иванова Г.А. Пожароопасность сосняков лесостепи и пути ее снижения. – Красноярск, 1987. – 112 с.
11. Описание химического блока ART: <http://www.imk-trto.kit.edu/download/LM-ART.pdf>
12. Ревокатова А.П. Метод расчета эмиссий угарного газа для прогноза загрязнения воздуха в Москве // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 6. – С. 39–51.
13. Ревокатова А.П., Суркова Г.В., Кислов А.В. О методе оперативного расчета эмиссий загрязняющих веществ в атмосферу на примере Москвы и Московской области // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 5. География. – 2013. – № 1. – С. 33–42.
14. Ревокатова А.П., Суркова Г.В., Кирсанов А.А., Ривин Г.С. Прогноз загрязнения атмосферы Московского региона с помощью модели COSMO-ART // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 5. География. – 2012. – № 4. – С. 25–32.
15. Сайт консорциума COSMO: <http://www.cosmo-model.org>
16. Суркова Г.В., Блинов Д.В., Кирсанов А.А., Ревокатова А.П., Ривин Г.С. Моделирование распространения шлейфов воздушных загрязнений от очагов лесных пожаров с использованием химико-транспортной модели COSMO-Ru7-ART // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27, № 1. – С. 75–81.
17. Оперативное управление охраной лесов: тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. совещ. / под ред. Л.Т. Шальгиной. – Красноярск, 1984. – 65 с.
18. Шешуков М.А., Савченко А.П., Пешков В.В. Лесные пожары и борьба с ними на севере Дальнего Востока. – Хабаровск, 1992. – 95 с.
19. Ackermann I., Hass H., Memmesheimer M., Ebel A., Binkowski F., Shankar U. Modal aerosol dynamics model for Europe development and first applications // Atmos. Environ. – 1998. – Vol. 32. – P. 2981–2999.
20. Adrian G., Fiedler F. Simulation of unstationary wind and temperature fields over complex terrain and comparison with observations // Contrib. Atmospheric Phys. . – 1991. – Vol. 64. – P. 27–48.
21. Andreae, M.O., Merlet P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning // Global Biogeochem. Cycles. – 2001. – Vol. 15. P. 955–966,
22. Baklanov A. Integrated Meteorological and Atmospheric Chemical Transport Modeling: Perspectives and Strategy for HIRLAM/HARMONIE // HIRLAM Newsletter No. 53. – March 2008.
23. Baldauf M., Seifert A., Förstner J., Majewski D., Raschendorfer M., Reinhardt T. Operational convective-scale numerical weather prediction with the cosmo model: description and sensitivities // Mon. Weather Rev. – 2011. – Vol. 139. P. 3887–3905. – doi:10.1175/MWR-D-10-05013.1.

24. *Battye W., Battye R.* Development of emissions inventory methods for wildland fire: final report. Contract 68-D-98-046. – U.S. Environmental Protection Agency Research Triangle Park, NC, 2002.

25. *Bartholome E. Belward A.* GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data // *Int. J. Remote Sens.* – 2005. – Vol. 26. – P. 1959–1977.

26. *Denier van der Gon H., Visschedijk A., van der Brugh H., Dröge R.* A high resolution European emission data base for the year 2005. A contribution to UBA- Projekt PAREST: Particle Reduction Strategies, TNO-report TNO-034-UT-2010-01895 RPTML, 2010.

27. *Grell G.A., Peckham S.E., Schmitz R., McKeen S.A.* Fully coupled “online” chemistry within the WRF model: description and applications // *Atmospheric Environment.* – 2005. – Vol. 39, Issue 37. – P. 6957–6975.

28. *Grell G. A., Emeis S., Stockwell W.R., Schoenemeyer T., Forkel R., Michalakes J., Knoche R., Seidl W.* Application of a multiscale, coupled MM5/chemistry model to the complex terrain of the VOTALP valley campaign // *Atmos. Env.* – 2000 – Vol. 34. – P. 1435–1453.

29. Global Land Cover 2000 database. European Commission, Joint Research Centre, 2003. – <http://bioval.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/glc2000.php>

30. Integrated systems of meso-meteorological and chemical transport models / Eds. A. Baklanov, A. Mahura, R.S. Sokhi – Springer, 2011. – 244 p.

31. *Knote C., Brunner D., Vogel H., Allan J., Asmi A., Äijälä M., Carbone S., van der Gon H.D., Jimenez J.L., Kiendler-Scharr A., Mohr C., Poulain L., Prévôt A.S.H., Swietlicki E., Vogel B.* Towards an online-coupled chemistry-climate model: evaluation of trace gases and aerosols in COSMO-ART // *Geosci. Model Dev.* – 2011. – Vol. 4. P. 1077–1102. – doi:10.5194/gmd-4-1077-2011.

32. *Konovalov I.B., Beekmann M., Kuznetsova I.N., Yurova A., Zvyagintsev A.M.* Atmospheric impacts of the 2010 Russian wildfires: integrating modelling and measurements of an extreme air pollution episode in the Moscow region // *Atmos. Chem. Phys.* – 2011. – Vol. 11. – P. 10031–10056.

33. *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 No. 54.* – December 2008.

34. *Kuenen J., Denier van der Gon H., Visschedijk A., van der Brugh H.* High resolution European emission inventory for the years 2003–2007 // TNO-report TNO-060-UT-2011-00588, 2011.

35. Maurizi A., D'Isidoro M., Mircea M. BOLCHEM, an integrated system for atmospheric dynamics and composition // Integrated systems of meso-meteorological and chemical transport models / Eds. A. Baklanov, A. Mahura, R.S. Sokhi. – Springer, 2011. – P. 89–94.
36. Nester K., Fiedler F. Modeling of the diurnal variation of air pollutants in a mesoscale area: Proceedings of the 9th World Clean Air Congress, Montreal, Vol. 5, Paper-No. IU-16C.02, 1992.
37. Riemer N., Vogel H., Vogel B., Fiedler F. Modelling aerosols on the mesoscale- $\mu$ : Treatment of soot aerosol and its radiative effects // J. Geophys. Res. – 2003. – Vol. 109. – P. 4601. – doi:10.1029/2003JD003448.
38. Steppeler J., Doms G., Schättler U., Bitzer H.W., Gassmann A., Damrath U., Gregoric G. Meso-gamma scale forecasts using the nonhydrostatic model LM, Meteorol // Atmos. Phys. – 2003. – Vol. 82. – P. 75–96.
39. Stockwell W.R., Middleton P., Chang J.S. The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling // J. Geophys. Res. – 1990. – Vol. 95. – P. 16343–16367.
40. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric chemistry and physics. From air pollution to climate change. – second edition. – John Wiley & Sons, Inc., 2006. – 1248 p.
41. Pulles T. Quality of emission data: Community right to know and national reporting // Environmental Sciences. – 2008. – Vol 5. – P. 151–160. – doi: 10.1080/15693430802141357.
42. Pulles T., Heslinga D. The Art of Emission Inventorying, – TNO-report, 2010.
43. Vogel H., Vogel B., Kottmeier Ch. Modelling of pollen dispersion with a weather forecast model system: Proceedings of 28th NATO/CCMS Int. Meeting on Air Pollution Modelling and its Application, Leipzig, 2006.
44. Vogel B., Vogel H., Baumer D., Bangert M., Lundgren K., Rinke R., Stanelle T. The comprehensive model system COSO-ART – Radiative impact of aerosol on the state of the atmosphere on the regional scale // Atmos. Chem. Phys. – 2009. – Vol. 9. – P. 8661–8680.
45. Vogel B., Vogel H., Baumner D., Bangert M., Lundgren K., Rinke R., Stanelle T. COSMO-ART: Aerosols and reactive trace gases within the COSMO model // Integrated systems of meso-meteorological and chemical transport models / Eds. A. Baklanov, A. Mahura, R. S. Sokhi. – Springer, 2011. – P.75–80.

*Поступила в редакцию 28.08.2014 г.*