

# СУТОЧНЫЙ ХОД ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВОЗДУХ ВЕЩЕСТВ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ И РАСЧЕТАМ ХИМИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ

*И.Ю. Шалыгина<sup>1</sup>, И.Н. Кузнецова<sup>1</sup>, М.И. Нахаев<sup>1</sup>,  
И.Б. Коновалов<sup>2</sup>, Е.В. Березин<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации*

*<sup>2</sup>Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород  
shalygina@mecom.ru, muza@mecom.ru*

## Введение

Численный прогноз загрязнения воздуха с использованием химических транспортных моделей (ХТМ) – обычная практика оценки качества воздуха в зарубежных странах; как и данные наблюдений, прогнозы отдельных концентраций и индекса качества воздуха доступны для широкого круга пользователей (например, [db.eurad.uni-koeln.de/index\\_ref.prognose/tmeur.html](http://db.eurad.uni-koeln.de/index_ref.prognose/tmeur.html), [aqicn.org/city/moscow/shabol](http://aqicn.org/city/moscow/shabol)).

Москва – один из немногих отечественных городов с развитой сетью автоматизированных наблюдений за взвешенными частицами, малыми газовыми примесями и некоторыми летучими органическими соединениями (ГПБУ «Мосэкомониторинг»); данные о содержании загрязняющих веществ в воздухе оперативно представляются на сайте (<http://www.mosecom.ru>) для информирования населения города о качестве московского воздуха. Наличие данных с высоким временным и пространственным разрешением – важный фактор для перехода от статистических методов прогнозирования к численному прогнозу качества воздуха с применением химической транспортной модели. В Гидрометцентре России создана технология расчета концентраций загрязняющих веществ, основой

которой являются две химические транспортные модели – COSMO-Ru7-ART и XTM CHIMERE [14, 15, 17], использующие различные кадастры эмиссий (<http://www.emep.int>, <https://www.tno.nl/en/>). Модель COSMO-Ru7-ART развивается в рамках консорциума COSMO, является встроенной в модель атмосферы COSMO-Ru7 и предусматривает описание эффекта влияния загрязнений на атмосферные процессы [17].

Принципиальным отличием другой используемой в технологии модели – XTM CHIMERE – является автономность расчетов концентраций загрязнений с усвоением на каждом временном шаге прогнозных метеорологических характеристик [18, 20, 22]. На этапе становления технологии расчеты по XTM CHIMERE проводились с усвоением данных модели атмосферы WRF-ARW [9, 23]. Сегодня обе химические транспортные модели используют прогнозы метеорологических характеристик одной модели COSMO-Ru7 [2], что оправдано и с точки зрения повышения эффективности расчетных экспериментов, нацеленных на установление причин модельных погрешностей прогнозов двух XTM, и с позиций разработки способов постобработки, в т. ч. планируемого ансамблирования модельных расчетов.

Целью представленного в этой статье исследования, являющегося частью многоплановой работы по верификации XTM, является оценка успешности модельных расчетов суточного хода путем сравнения с внутрисуточным циклом концентраций малых газовых примесей (МГП) и взвешенных частиц, установленного по измерениям на автоматизированных станциях контроля загрязнения (АСКЗА) в Москве. Успешность воспроизведения XTM внутрисуточной различающейся по сезонам изменчивости концентраций примеси является информативным индикатором качества расчетов многих модельных характеристик. В их числе средняя и максимальная за сутки концентрация загрязняющих веществ (используются для оценки соблюдения гигиенических нормативов [4]), адекватность суточного распределения эмиссий [6, 20] и их величины, согласованность изменчивости уровня загрязнения с термическим и динамическим перемешиванием и мн. др.

Для оценки успешности динамики модельного суточного хода необходимо опираться на надежные данные о короткопериодных колебаниях приземных концентраций. Анализ суточного хода

концентраций газовых и аэрозольных загрязнений посвящен значительный ряд зарубежных научных публикаций (например, [21, 24]), временные вариации загрязнений в приземном воздухе Лондона обсуждаются в [10]. По данным измерений концентраций загрязняющих веществ в воздухе Москвы отдельными группами исследователей проведены разноплановые исследования [1, 3, 5, 11]; одна из последних публикаций подготовлена по наблюдениям на станции экологического мониторинга ИФА РАН – МГУ, в ней обсуждаются сезонные особенности суточного хода МГП ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  и  $\text{O}_3$ ) [7, 8].

Выполненный нами анализ суточного хода приземных концентраций загрязняющих веществ по наблюдениям и модельным расчетам нацелен на подготовку рекомендаций для постобработки расчетов ХТМ; для этого важно понимать не только закономерности сезонной изменчивости и суточной динамики отдельных веществ, но и особенности пространственной неоднородности полей концентрации. В статье представлены некоторые результаты расчетов и сравнений для центральных месяцев четырех сезонов.

### **Использованные данные**

*Данные наблюдений.* Используются данные автоматизированных измерений ГПБУ «Мосэкомониторинг» концентраций угарного газа ( $\text{CO}$ ), диоксида азота ( $\text{NO}_2$ ) и взвешенных частиц размером не более 10 мкм ( $\text{PM}_{10}$ ) на АСКЗА в Москве ([www.mosecom.ru](http://www.mosecom.ru)). База данных для анализа сформирована по измерениям МГП на 25–35 АСКЗА,  $\text{PM}_{10}$  – на 13 станциях. Анализ усредненных для каждого часа концентраций, полученных по данным измерений с дискретностью 20 мин, проведен для центральных месяцев четырех сезонов (январь, апрель, июль, октябрь) 2015 г. – периода с максимальным числом действующих АСКЗА и высоким качеством измерений. В выбранный период экстремальных метеорологических ситуаций и высоких уровней загрязнения, которые могли повлиять на статистические показатели загрязнения, не наблюдалось.

*Модельные расчеты.* Для анализа использованы расчеты концентраций химической транспортной модели CHIMERE. Адаптация ХТМ CHIMERE в вычислительной среде Гидрометцентра России проводится совместно с ИПФ РАН (Нижний Новгород).

Оценивались прогностические величины почасовых концентраций CO, NO<sub>2</sub> и PM<sub>10</sub> в узлах модельной сетки (0,25°x0,25°) с усвоением метеорологических данных модели атмосферы COSMO-Ru7.

### Суточный ход приземных концентраций CO, NO<sub>2</sub> и PM<sub>10</sub>

**Оксид углерода** – долгоживущее вещество; основным источником его являются выбросы автотранспорта, на долю которого в Москве, по экспертным оценкам (mosecom.ru), приходится более 90 % выбросов загрязняющих МГП. Для расчета среднего суточного хода CO использованы данные измерений на расположенных в разных частях города 28 АСКЗА. Усредненный по всем АСКЗА суточный ход концентрации CO в срединных месяцах сезонов приведен на рис. 1, здесь же показана суточная динамика стандартного отклонения («усы» на боксовых диаграммах). Следует отметить, что в Москве средний уровень загрязнения приземного воздуха угарным газом низкий (mosecom.ru), в основном в 3–5 раз меньше гигиенических нормативов [4].

Вначале отметим, что рассчитанные нами суточные ходы концентрации CO согласуются с полученными другими исследователями [1, 3, 5, 7, 8, 11, 19]. На рис. 1 отчетливо видны совпадения формы суточного хода CO зимой и осенью с характерными ночным минимумом и слабовыраженным бимодальным дневным максимумом.

Обратное внутрисуточное распределение концентрации CO весной и летом: самый низкий уровень CO и минимальные величины СКО наблюдаются после полудня, основной суточный максимум формируется около полуночи, ночью уровень CO понижается, в 6–8 ч имеет место устойчивый вторичный максимум. Видно, что в теплый период суточный ход CO отличается высокой изменчивостью в ночное и утреннее время с 21 до 8 ч, что связано с увеличением повторяемости неблагоприятных для очищения воздуха метеорологических условий (НМУ) по сравнению с частотой НМУ в осенне-зимний период [1, 13].

**Диоксид азота** – продукт химических преобразований выбросов автотранспортом и предприятиями теплоэнергетики, вторичный загрязнитель воздуха с большим, чем

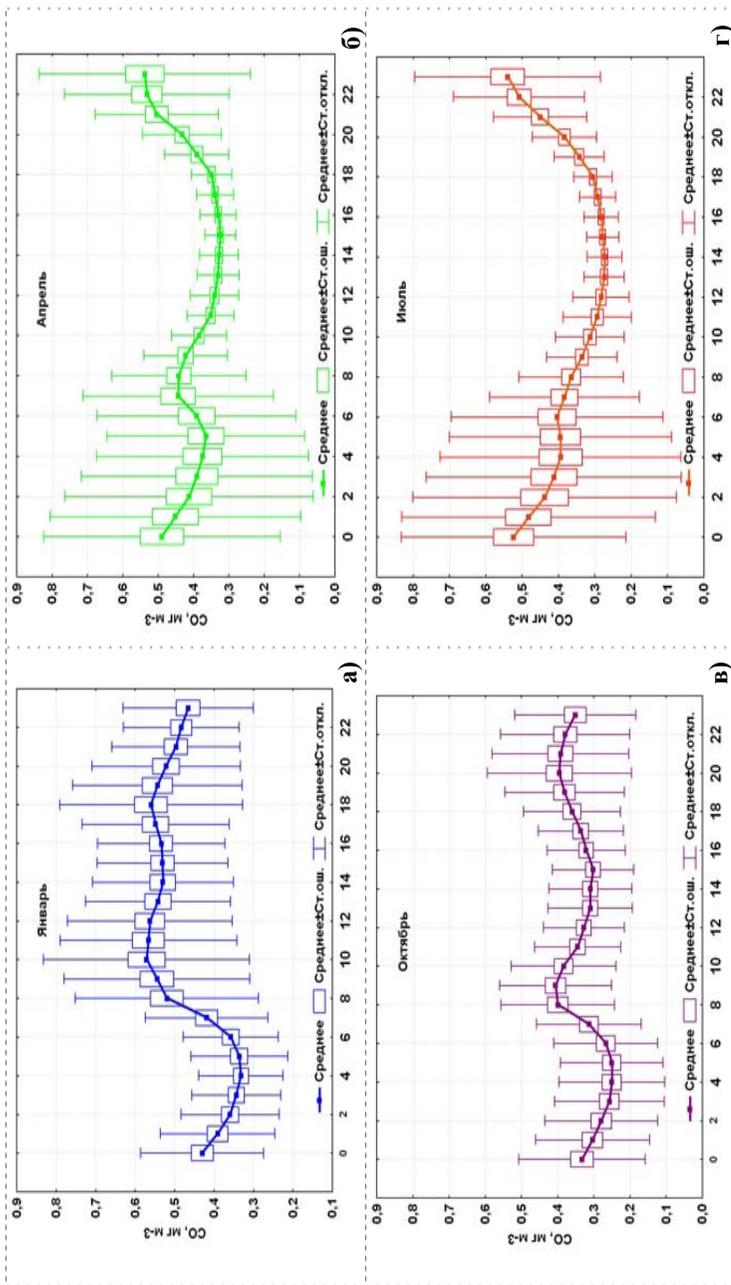


Рис. 1. Суточный ход усредненной по городским станциям концентрации CO январь (N=868) (а), апрель (N=840) (б), октябрь (N=868) (в), июль (N=868) (г). Москва, 2015 г.

предшественник, классом опасности [4]. Для расчета среднего суточного хода  $\text{NO}_2$  использованы данные 27 АСКЗА городского и примагистрального типов. Усредненный суточный ход средних по городу концентраций в центральных месяцах сезонов приведен на рис. 2. Следует отметить, что в Москве средний уровень загрязнения приземного воздуха диоксидом азота в зимний и весенний сезоны повышенный – примерно на уровне ПДКс.с. ( $0,04 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ ), летом и осенью – в основном меньше гигиенических требований (mosecom.ru).

Можно заметить (рис. 2), что форма суточного хода концентраций  $\text{NO}_2$  в каждый из сезонов совпадает с формой среднего суточного хода  $\text{CO}$ . Так же, как  $\text{CO}$ , усредненный суточный ход группируется по форме в два типа: весенне-летний и осенне-зимний (условно, суточный ход теплого и холодного сезонов).

В холодный сезон суточный минимум  $\text{NO}_2$  наблюдается ночью. Днем осенью наблюдаются слабовыраженные утренний и вечерний максимумы, в зимнее время суточная амплитуда больше, более выражены утренний и вечерний максимумы  $\text{NO}_2$ .

В апреле и июле основной суточный минимум отмечается в дневные часы (11–17 ч), главный суточный максимум формируется в околополуночные часы, утром (7–9 ч) наблюдается второй суточный максимум. Как и в суточной динамике  $\text{CO}$ , наибольшие флуктуации  $\text{NO}_2$  (СКО) характерны для ночного и утреннего времени, что связано с увеличением частоты НМУ.

**Взвешенные частицы  $\text{PM}_{10}$**  (particulate matter) с размерами частиц от 1 до 10 мкм, вредное воздействие на организм человека которых оценивается Всемирной организацией здравоохранения как наиболее опасное [16], имеют как антропогенное, так и природное происхождение. Нередко повышение уровня  $\text{PM}_{10}$  в воздухе Москвы происходит вследствие ветрового подъема пылевых частиц или прихода загрязненной воздушной массы из районов весенних пахотных работ, лесных пожаров, песчаных бурь и почвенной засухи и пр. [3, 12].

На АСКЗА ГПБУ «Мосэкомониторинг» в основном измеряются массовые концентрации  $\text{PM}_{10}$  – взвешенных частиц размером не более 10 мкм (13 АСКЗА); контроль  $\text{PM}_{2.5}$  проводится на 8 АСКЗА, что недостаточно для получения статистически надежных результатов.

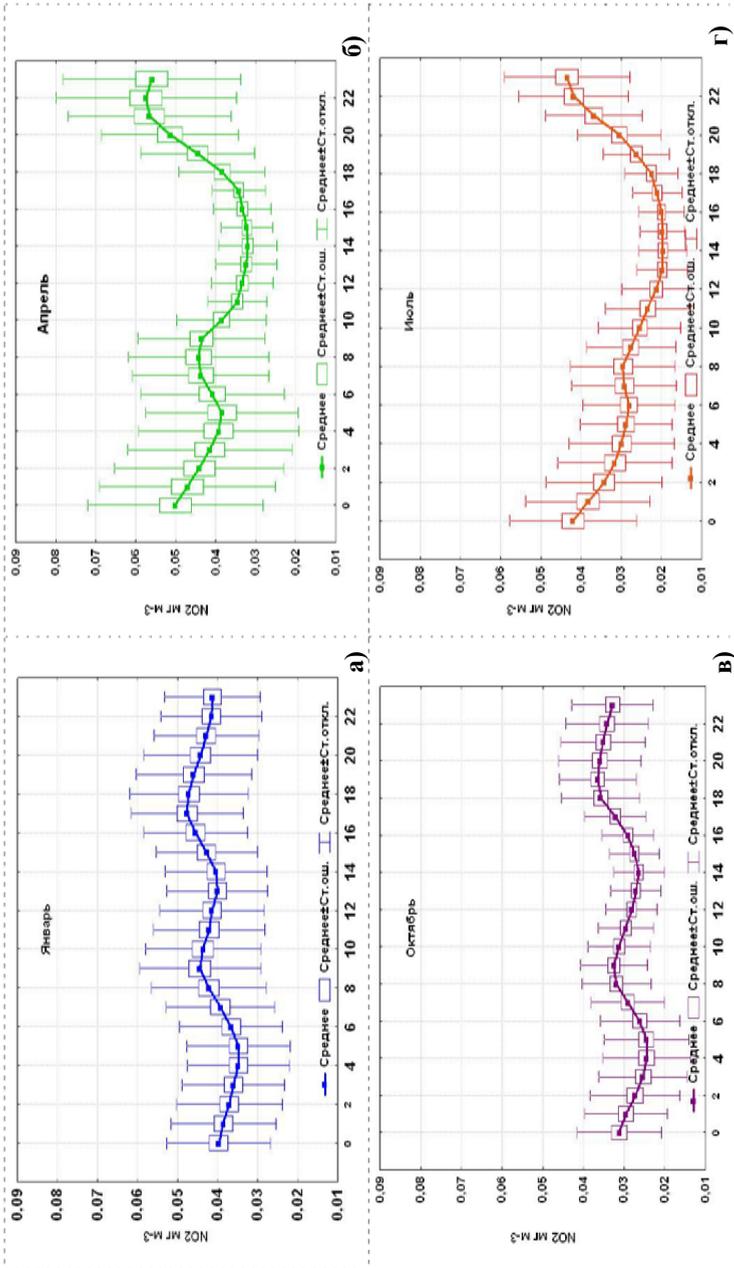


Рис. 2. Суточный ход усредненной по городским станциям концентрации NO<sub>2</sub> январь (N=837) (а), апрель (N=810) (б), июль (N=837) (в), октябрь (N=837) (г). Москва, 2015 г.

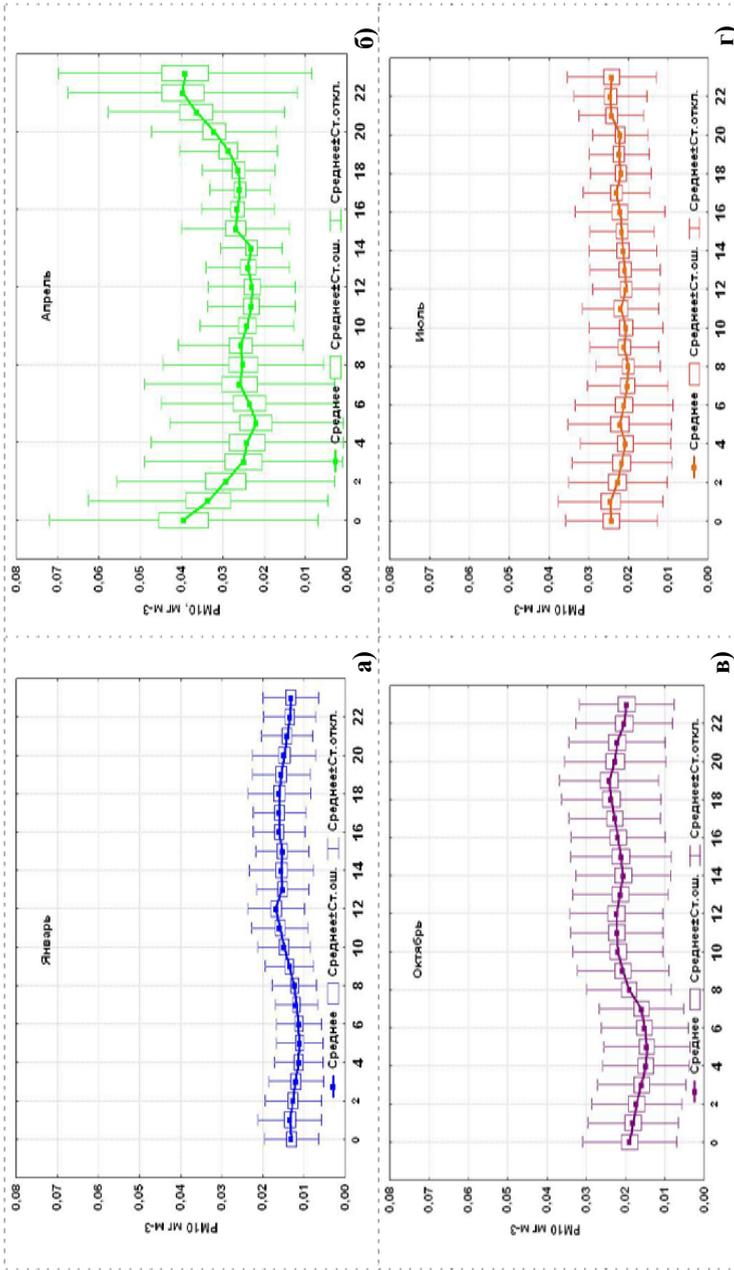


Рис. 3. Суточный ход усредненной по городским станциям концентрации PM<sub>10</sub> январь (N=403) (а), апрель (N=390) (б), июль (N=403) (в), октябрь (N=403) (г). Москва, 2015 г.

Рассчитанный по измерениям усредненный суточный ход средних по городу концентраций  $PM_{10}$  и стандартного отклонения представлен на рис. 3. Учитывая, что величина принятой в нашей стране предельно допустимой концентрации (ПДКс.с.)  $PM_{10}$  составляет  $0,06 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$  [4], можно сделать вывод, что уровень  $PM_{10}$  и его пространственно-временная изменчивость в Москве в среднем незначительны.

Приведенные на рис. 3 иллюстрации подтверждают, что зимой при наличии снежного покрова уровень  $PM_{10}$  самый низкий в году; о небольшом антропогенном вкладе  $PM_{10}$  в это время года свидетельствует едва заметный растянутый дневной максимум. Летом невыраженный усредненный по городу суточный ход  $PM_{10}$  по форме близок к зимнему и осеннему с той разницей, что суточному ходу в октябре свойственны наибольшие СКО.

Усредненный суточный ход  $PM_{10}$  весной резко отличается от других сезонов. Отдельно отметим, что на апрель приходится и годовой максимум  $PM_{10}$ . В апреле (в отсутствие растительного покрова подстилающей поверхности) наблюдается хорошо выраженная суточная амплитуда: суточный максимум  $PM_{10}$  формируется в околополуночное время, после полудня наблюдается суточный минимум, но его величина больше уровня максимумов в другие сезоны года. Высокую нестабильность фона  $PM_{10}$  в воздухе Москвы в апреле подтверждают величины стандартного отклонения – ночью они почти в 3 раза больше послеполуденных ( $0,03$  и  $0,01 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$  соответственно). Приведенные результаты анализа указывают на специфические черты загрязнения воздуха Москвы взвешенными частицами и отличия от суточного и сезонного хода  $PM_{10}$  в европейских городах [21].

### **Сравнения наблюдаемого суточного хода $CO$ , $NO_2$ , $PM_{10}$ с модельными расчетами**

Успешность модельного расчета суточного хода концентраций загрязняющих веществ отражается на качестве прогноза средней и максимальной за сутки величины. Именно по названным характеристикам принято оценивать прогнозы загрязнения приземного воздуха. В таблице приведены статистические показатели ошибок

модельных прогнозов ХТМ CHIMERE в холодный и теплый сезон 2015 года. Полученные на репрезентативной выборке результаты сравнений дали основание сделать главные выводы:

- имеет место сезонная устойчивость знака модельных ошибок концентраций каждого из рассматриваемых загрязняющих веществ: систематическое завышение CO, NO<sub>2</sub> и небольшое занижение PM<sub>10</sub>;

- средние суточные концентрации рассчитываются с меньшими погрешностями по сравнению с ошибками прогноза максимальных за сутки концентраций.

*Таблица*

**Статистические показатели ошибок модельных прогнозов средних суточных и максимальных за сутки концентраций загрязняющих веществ (мг·м<sup>-3</sup>) 2015 г.**

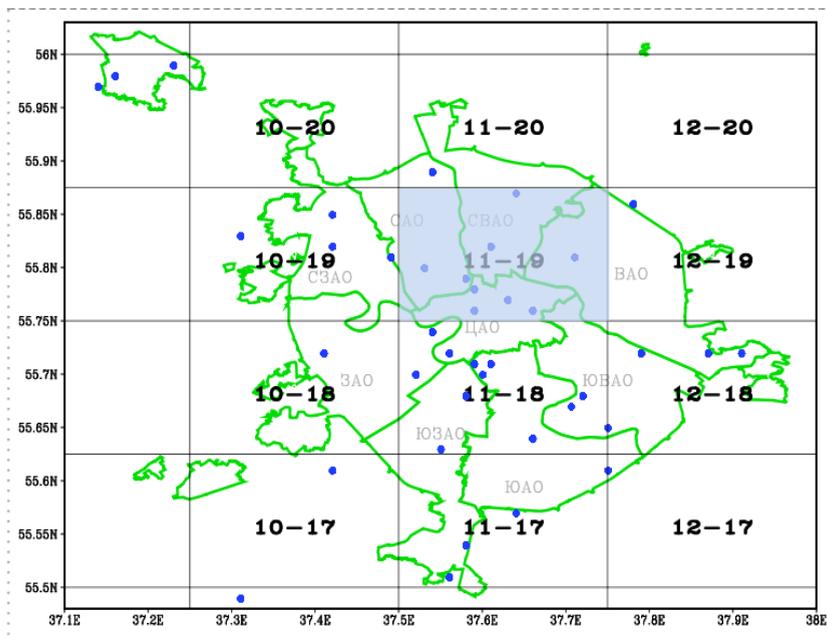
Сезон	Вещество	Средняя суточная концентрация					Максимальная за сутки концентрация				
		измерение	модель	ошибка			измерение	модель	ошибка		
				δ	δ	σ			δ	δ	σ
Холодный	CO	0,39	0,58	0,21	0,30	0,36	0,84	1,03	0,24	0,63	0,85
	NO <sub>2</sub>	0,03	0,05	0,02	0,03	0,02	0,05	0,08	0,03	0,04	0,04
	PM <sub>10</sub>	0,02	0,01	-0,01	0,01	0,01	0,04	0,02	-0,02	0,02	0,03
Теплый	CO	0,44	0,96	0,52	0,59	0,65	0,98	1,82	0,84	1,09	1,14
	NO <sub>2</sub>	0,03	0,08	0,05	0,05	0,04	0,06	0,13	0,08	0,08	0,07
	PM <sub>10</sub>	0,02	0,02	-0,01	0,01	0,01	0,05	0,03	-0,02	0,03	0,04

Примечание: δ – средняя ошибка, |δ| – средняя абсолютная ошибка, σ – среднее квадратическое отклонение.

Значительно больше информации дает анализ модельного воспроизведения суточного хода концентраций загрязняющих веществ. Различия между данными модельных расчетов и измерений определялись при использовании расчетов ХТМ на период 24–48 ч от срока 0 ч ВСВ; при этом начальные условия задавались

на основе расчетов в предшествующие трое суток с целью обеспечения квазистационарности полей концентраций загрязняющих веществ [9, 11].

Выполнены сравнения модельных величин с усредненными данными измерений на АСКЗА, расположенных внутри материнской ячейки (рис. 4), также проведены сравнения с измерениями концентраций на отдельных АСКЗА.



**Рис. 4. Расчетная сетка XTM CHIMERE с заливкой модельной ячейки, результаты сравнительного анализа которой обсуждаются в работе.**

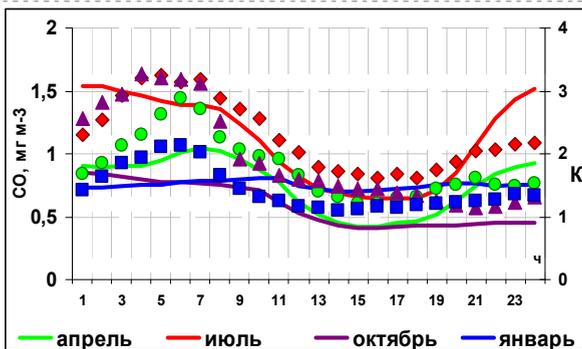
Рассмотрим характеристики и особенности модельных расчетов отдельных примесей, оценивая адекватность воспроизведения XTM формы суточного хода, внутрисуточных максимумов и внутрисуточной динамики величины отклонений модель – наблюдение в срединные месяцы сезонов.

На рис. 5 показаны суточные ходы концентраций  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$  и  $\text{PM}_{10}$  по расчетам ХТМ CHIMERE и параметра  $K$ , рассчитываемого как отношение концентрации «модель – наблюдение».

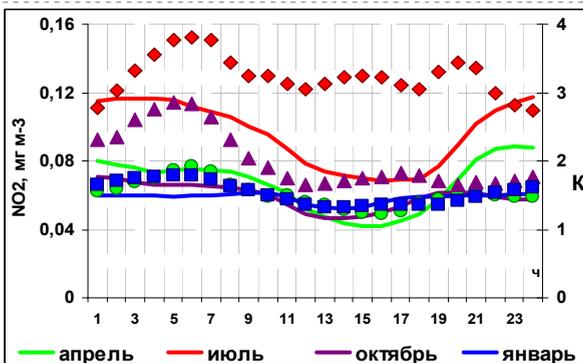
На рис. 5 а, где представлены результаты расчетов  $\text{CO}$ , видны сезонные различия модельного расчета суточного хода: практически без суточной амплитуды ход  $\text{CO}$  в январе, совпадающие по форме суточные ходы в апреле и июле со смещением на 0,2–0,3  $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$  летом в интервал больших величин и близкий к весеннему (за исключением последних четырех часов) суточный ход осенью. Заметим, что если зимний суточный ход  $\text{CO}$  по расчетам ХТМ резко отличается от наблюдающегося (рис. 1), то в другие сезоны модель в целом удовлетворительно воспроизводит вид суточного хода.

Особый интерес представляют внутрисуточные изменения погрешности модельного расчета, о которых можно судить по параметру  $K$  (чем  $K$  ближе к 1, тем точнее модельный прогноз). Первое, на что обращает внимание, это величины  $K > 1$ , указывающие на завышенные эмиссии  $\text{CO}$  в используемом ХТМ CHIMERE кадастре (ЕМЕР). Также очевидно, что в ХТМ CHIMERE внутрисуточное распределение эмиссий отличается от характерного для Москвы режима выбросов  $\text{CO}$ : самые большие величины  $K$  приходятся на первую половину суток (зимой – на ночное время), они почти в 2 раза больше послеполуденных величин  $K$ . Нельзя не отметить, что самые большие величины  $K$  и, соответственно, наибольшие завышения эмиссий  $\text{CO}$  в июле.

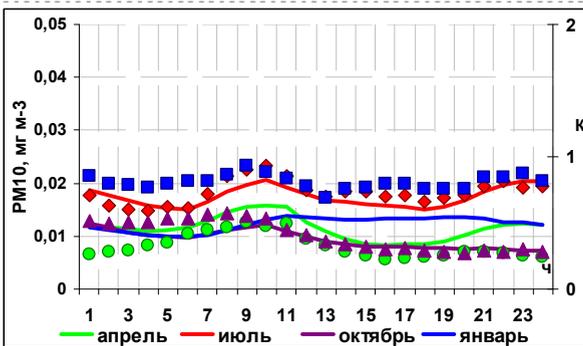
Модельные расчеты суточного хода  $\text{NO}_2$  оказались более успешными. На рис. 5 б видны совпадающие зимой и осенью модельные расчеты суточного хода  $\text{NO}_2$  со слабовыраженной суточной амплитудой и ночным максимумом. А по данным измерений в усредненном суточном ходе  $\text{NO}_2$  в Москве в холодный сезон, концентрации диоксида азота ночью меньше дневных. Отметим, как и у  $\text{CO}$ , весной и летом формы модельного суточного хода  $\text{NO}_2$  совпадают (в июле со смещением на 0,02–0,04  $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$  в интервал больших величин). Важно отметить, что рассчитываемый ХТМ суточный ход в теплый сезон по виду и суточной амплитуде совпадает с данными наблюдений (рис. 2).



а)



б)



в)

Рис. 5. Усредненный за месяц модельный суточный ход концентраций загрязняющих веществ, суточный ход параметра К (маркеры с соответствующим месяцу расчета цветом): CO (а), NO<sub>2</sub> (б), PM<sub>10</sub> (в), 2015 г.

Параметр  $K$ , так же как и у  $CO$ , в течение суток во все сезоны больше 1, т. е. ХТМ CHIMERE завывает концентрации  $NO_2$ . Обращают на себя внимание (рис. 5 б) различающиеся по сезонам модельные погрешности с максимальными завывшениями  $NO_2$  в июле (в 3 раза днем и почти до 4-х ночью) и наименьшими зимой и весной ( $K = 1,3-1,8$ ). В суточном ходе модельных ошибок (как и  $CO$ ) наблюдается тенденция увеличения их величин от дневных часов (минимум отклонений) к ночи с максимумом погрешностей во все сезоны в интервале 3–7 часов.

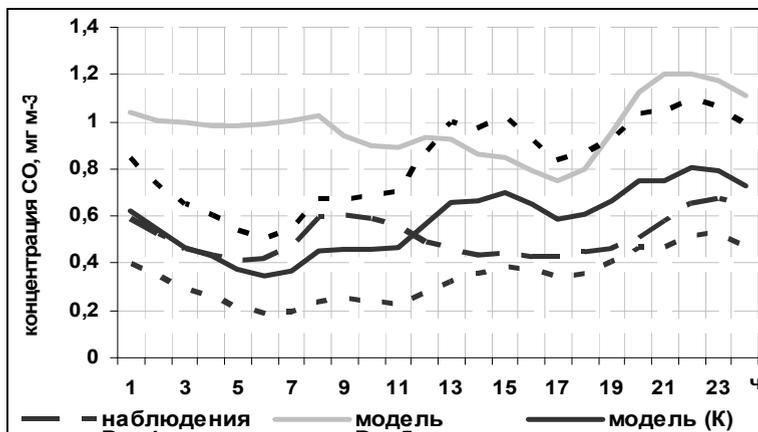
В отличие от газовых загрязнений, ХТМ CHIMERE систематически занижает уровень аэрозольного загрязнения воздуха в Москве, на что указывают величины параметра  $K < 1$  (рис. 5 в). Выше отмечалось, что в среднем уровень  $PM_{10}$  в приземном воздухе мегаполиса невысокий и составляет примерно 0,3–0,5 ПДКс.с. (см. рис. 3). Установлено, что с самыми меньшими ошибками ХТМ CHIMERE воспроизводит утренний и вечерний максимумы  $PM_{10}$  (слабовыраженные по наблюдениям и в модельных расчетах), вполне удовлетворительно – суточный ход  $PM_{10}$  зимой и летом, а с самыми большими ошибками – осенью и весной. Отметим еще раз (рис. 3 б), что приземные концентрации  $PM_{10}$  в апреле самые большие в году, для этого месяца характерна значительная изменчивость СКО.

### **Коррекция модельных прогнозов**

Выявленные на этапе верификации ХТМ характерные внутрисуточные погрешности модельных расчетов – мотивировка для проведения постобработки модельных расчетов с целью устранения систематической ошибки с пониманием того обстоятельства, что кроме неточности эмиссий на модельные ошибки влияют и другие факторы, среди них ошибки модельного прогноза метеорологических характеристик (в первую очередь температуры и скорости ветра в нижней тропосфере, а также влажности и осадков) в некоторых случаях могут оказывать большее влияние на конечный результат, чем неточность эмиссий. Такими случаями являются непредусмотренные моделью атмосферы НМУ или ошибочные (страховочные) прогнозы термической устойчивости и слабого ветра в атмосферном пограничном слое.

Установленные на данных модельного ряда и наблюдений в 2015 г. почасовые поправочные коэффициенты (параметр К) оценены с точки зрения эффективности их применения для постобработки ежедневных прогнозов с целью минимизации систематической погрешности. Проверка проводилась на независимой выборке весной 2016 г., ее результаты оказались весьма убедительными для осуществления коррекции модельных расчетов.

На рис. 6 демонстрируется усредненный за апрель модельный суточный ход  $\text{CO}$  с коррекцией и без нее, а также суточный ход  $\text{CO}$  по данным измерений на АСКЗА в модельной ячейке 11–19 (рис. 4). Следует признать несомненный положительный эффект применения статистической коррекции, которая обеспечила приближение модельных расчетов *средней за сутки концентрации  $\text{CO}$*  к наблюдавшейся, уменьшив ее с  $0,977 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$  (без коррекции) до  $0,579 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$  при наблюдавшейся концентрации  $0,51 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ . Модельные ошибки почасовых расчетов уменьшились с  $0,4\text{--}0,6$  до  $0,1\text{--}0,2 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ . При устранении систематического завышения ежечасных величин  $\text{CO}$ , благодаря коррекции, максимальный эффект получен в расчетах концентрации  $\text{CO}$  ночью и в вечерние часы.



**Рис. 6. Усредненный суточный ход измеренной на АСКЗА (10 станций) концентрации  $\text{CO}$  (наблюдения), модельных расчетов до коррекции (модель) и с ее учетом (модель К, штриховые линии – СКО). Апрель 2016 г.**

Следует отметить и *относительную неудачу* коррекции в послеполуденные часы (в 14–17 ч); при позитивном снижении начального модельного уровня скорректированные расчеты имели *большую погрешность*, чем даже в часы вечернего максимума. Наиболее вероятной причиной этого, как показал анализ ежедневных модельных прогнозов СО, могли быть несколько ложных прогнозов, препятствующих очищению приземного воздуха атмосферных условий и, как следствие, страховочных прогнозов повышения уровня СО.

Эффективность постобработки модельных прогнозов весной 2016 года подтверждена анализом результатов статистической коррекции других загрязняющих веществ. Планируется продолжить тестирование на данных наблюдений в следующие сезоны.

### **Заключение**

Созданная в Гидрометцентре России технология прогнозирования качества воздуха с применением химических транспортных моделей отечественных аналогов не имеет; сегодня она находится на этапе верификации численных расчетов по данным автоматизированных измерений концентраций загрязняющих веществ. Регулярные сравнения модельных расчетов и наблюдаемых концентраций позволили выявить характерные для приоритетных загрязнителей воздуха модельные погрешности, обусловленные двумя главными факторами – неточностью эмиссий используемых кадастров и ошибками прогнозов метеорологических параметров.

Предложен способ постобработки модельных расчетов с применением статистической коррекции почасовых расчетов концентраций загрязняющих веществ. Его проверка на независимой выборке (весна 2016 года) показала эффективность и целесообразность применений в оперативной технологии.

В развитии технологии прогнозирования качества воздуха на основе ХТМ предполагается провести тестирование разных способов статистической коррекции для повышения точности численных прогнозов приземных концентраций загрязняющих веществ.

Выражаем благодарность ГПБУ «Мосэкомониторинг», Департаменту природопользования и охраны окружающей среды

Правительства Москвы за сотрудничество в области развития технологии прогнозирования качества воздуха и предоставление данных о загрязнении.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ №14-05-00481.

### Список использованных источников

1. Вильфанд Р.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Звягинцев А.М., Нахаев М.И., Захарова П.В., Лапченко В.А. Мониторинг и прогнозирование качества воздуха в Московском регионе // Биосфера. – 2014. – Т. 6, № 4. – С. 339–351.

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. 5–20.

3. Глазкова А.А., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Семутникова Е.Г. Суточный ход концентрации аэрозоля (PM<sub>10</sub>) летом в Московском регионе // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25, № 6. – С. 495–500.

4. ГН 2.1.6.1338-03. Гигиенические нормативы. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест.

5. Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Зоткин Е.В. и др. Вариации газовых компонент загрязнения в воздушном бассейне г. Москвы // Изв. РАН. ФАО. – 2006. – Т. 42. – С. 176–190.

6. Донченко В.В., Кунин Ю.И., Рузский А.В., Виженский В.А. Методы расчета выбросов от автотранспорта и результаты их применения // Журнал автомобильных инженеров. – 2014. – № 3. – С. 44–51.

7. Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Беликов И.Б. и др. Закономерности изменчивости концентраций малых газовых составляющих в приземном воздухе г. Москвы // Известия РАН. ФАО. – 2007. – Т. 43. – С. 219–231.

8. Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Трифанова А.В. и др. О содержании малых газовых примесей в приземном слое атмосферы над Москвой // Известия РАН. ФАО. – 2015. – Т. 51. – С. 39–51.

9. Заритов Р.Б., Коновалов И.Б., Глазкова А.А. Расчет концентраций загрязняющих веществ с использованием модели атмосферы WRF-ARW и химико-транспортной модели CHIMERE // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 12. – С. 52–67.

10. Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Тарасова О.А., Шалыгина И.Ю. Изменчивость концентраций основных загрязнителей воздуха в Лондоне // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27, № 5. – С. 424–434.
11. Кузнецова И.Н., Коновалов И.Б., Глазкова А.А., Нахаев М.И., Зарипов Р.Б., Лезина Е.А., Звягинцев А.М. Наблюдаемая и рассчитанная изменчивость концентраций взвешенного вещества в Москве и Зеленограде // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 3. – С. 48–60.
12. Кузнецова И.Н., Глазкова А.А., Шалыгина И.Ю. и др. Сезонная и суточная изменчивость концентраций взвешенных частиц в приземном воздухе жилых районов Москвы // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27. – С. 473–482.
13. Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И. и др. Неблагоприятные для качества воздуха метеорологические факторы // Труды Гидрометцентра России. – 2014. – Вып. 351. – С. 154–172.
14. Нахаев М.И., Березин Е.В., Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Коновалов И.Б., Блинов Д.В., Лезина Е.А. Экспериментальные расчеты концентраций PM<sub>10</sub> и CO комплексом моделей CHIMERE и COSMO-Ru7 // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 28, № 6. – С. 569–578.
15. 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.
16. Рекомендации ВОЗ по качеству воздуха, касающиеся твердых частиц, озона, двуокиси азота и двуокиси серы. Глобальные обновленные данные. 2005 год. – Женева: ВМО, 2006.
17. Суркова Г.В., Курсанов А.А., Кислов А.В., Ревокатова А.П., Ривин Г.С. Прогноз концентрации загрязняющих веществ с помощью объединенной модели COSMO-Ru7-ART // Труды Гидрометцентра России. – 2014. – № 352. – С. 115–138.
18. CHIMERE chemistry – transport model. – <http://www.lmd.polytechnique.fr/chimere/>, Institut Pierre Simon Laplace, 2001–2014.
19. Gorchakov G., Semoutnikova E., Karpov A., Lezina E. Air Pollution in Moscow Megacity // Advanced topics in environmental health and air pollution case studies. Intech. – 2011. – P. 211–236. – <http://www.intechopen.com>.
20. Kukkonen J., Olsson T., Schultz D. M., Baklanov A. et al. A review of operational, regional-scale, chemical weather forecasting models in Europe // Atmos. Chem. Phys. – 2012. – Vol. 12. – P. 1–87.

21. *Makra L., Mayer H., Mika J., Sánta T., Holst J.* Variations of traffic related air pollution on different time scales in Szeged, Hungary and Freiburg, Germany // *Physics and Chemistry of the Earth*. – 2010. – Vol. 35. – P. 85–94.

22. *Menut L., Bessagnet B., Khvorostyanov D. et al.* CHIMERE 2013: a model for regional atmospheric composition modelling // *Geosci. Model Dev.* – 2013. – Vol. 6. – P. 981–1028.

23. *Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X.-Y., Wang W., Powers J.G.* A Description of the advanced research WRF Version 3, NCAR Tech. Notes–475+STR. – Boulder, Colorado, USA, 2008. – 113 p.

24. *Yang K.-L.* Spatial and seasonal variation of PM10 mass concentrations in Taiwan // *Atmos. Environ.* – 2002. – Vol. 36. – P. 3403–3411.

*Поступила в редакцию 31.05.2016 г.*