

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ХИМИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ CHIMERE И МОДЕЛИ COSMO-RU7

*М.И. Нахаев¹, Е.В. Березин², И.Ю. Шалыгина¹,
И.Н. Кузнецова¹, И.Б. Коновалов², Д.В. Блинов¹*

*¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации*

*²Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
muratmeteo@mail.ru, e.berezin@appl.sci-nnov.ru, shalygina@mecom.ru,
muza@mecom.ru, konov@appl.sci-nnov.ru, denisblinov@ya.ru*

Введение

Следуя мировой тенденции, в Гидрометцентре России в последние годы созданы технологии для численного прогноза концентраций загрязняющих веществ на основе расчетов химических транспортных моделей (ХТМ). Подробное описание вычислительных комплексов, а также первые результаты сравнения модельных и измеренных концентраций приводятся в [2–4, 7–10].

В Гидрометцентре России в системе негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды COSMO-Ru7, благодаря сотрудничеству в рамках консорциума COSMO, создан и функционирует вычислительный комплекс COSMO-Ru7-ART [9, 11, 12], основанный на разработках и тестировании ХТМ участниками консорциума [28, 29].

Первым реализованный в Гидрометцентре России вычислительный комплекс, состоящий из модели атмосферы WRF-ARW и химической транспортной модели CHIMERE (обе модели находятся в открытом доступе), в настоящее время преобразован в оперативную технологию численного прогноза концентраций

загрязняющих веществ на основе ХТМ CHIMERE с усвоением метеорологических данных мезомасштабной гидродинамической модели атмосферы и деятельного слоя суши COSMO-Ru с шагом сетки 7 км. Интеграция этих моделей призвана обеспечить устойчивость и оперативность расчетов концентраций загрязняющих веществ, а также изучение влияния отдельных параметризаций различных процессов, учитываемых в ХТМ, на получаемые результаты. Обновленная технология не требует привлечения дополнительных мощных вычислительных ресурсов: расчет метеорологических характеристик производится COSMO-Ru7 в “рутинном” режиме на суперкомпьютере «Торнадо», расчеты по ХТМ CHIMERE с усвоением данных COSMO-Ru7 осуществляются на персональной рабочей станции.

Реализация вычислительного комплекса CHIMERE/COSMO-Ru7 осуществлена при поддержке сотрудников Института прикладной физики РАН, Нижний Новгород, первыми в нашей стране адаптировавшими ХТМ CHIMERE к российским условиям.

В данной работе представлены некоторые результаты сравнений расчетов по усовершенствованной технологии (CHIMERE/COSMO-Ru7) с данными измерений, обсуждаются различия расчетов ХТМ CHIMERE при смене метеорологических моделей.

Для тестирования и оценки качества численного прогноза концентраций загрязняющих веществ использованы данные наблюдений на сети автоматизированного контроля загрязнения приземного воздуха в Москве ГПБУ «Мосэкомониторинг» (www.mosecom.ru).

1. Об особенностях вычислительного комплекса CHIMERE/COSMO-Ru7

Химическая транспортная модель CHIMERE – современная мезомасштабная химическая транспортная модель, обладающая открытым кодом [13, см. также сайт модели: <http://www.lmd.polytechnique.fr/chimere/>]. ХТМ CHIMERE предназначена для расчетов концентраций малых газовых и аэрозольных составляющих в нижней атмосфере. ХТМ CHIMERE учитывает

наиболее важные процессы, определяющие пространственно-временные распределения концентраций малых примесей атмосферы, среди них – химические процессы (более 300 химических газофазных и гетерогенных реакций с участием около 80 веществ), процессы адвективного и турбулентного переноса, фотолиз, сухое осаждение и вымывание химических веществ. Кроме этого, в модели учтены основные процессы, определяющие эволюцию аэрозолей (нуклеация, абсорбция, коагуляция, сальтация и осаждение), причем рассматриваются как первичные аэрозоли, образующиеся, в частности, вследствие подъема пыли, так и вторичные органические и неорганические аэрозоли, возникающие вследствие образования конденсируемых веществ в реакциях газообразных примесей. Подробное описание модели можно найти в работе [25]. Эта модель в последние годы успешно применяется в исследованиях состава нижней атмосферы над территорией России [6, 21, 22].

Расчеты концентраций загрязняющих веществ в Московском регионе выполняются с использованием технологии вложенного домена. А именно, на первом этапе выполняются расчеты с разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ для “континентального” домена для большей части Европейской территории России ($20\text{--}56^\circ$ в.д.; $48\text{--}66^\circ$ с.ш.). Почасовые данные этих расчетов используются в качестве граничных условий для расчетов, выполняемых с более высоким разрешением $0,25^\circ \times 0,125^\circ$ для меньшего “регионального” домена, охватывающего часть центрально-европейского региона России ($35\text{--}45,2^\circ$ в.д.; $53,55\text{--}58^\circ$ с.ш.). Расчеты производятся для 12 уровней по вертикали. Расстояние между уровнями увеличивается по мере удаления от поверхности: вблизи поверхности составляет ~ 50 м, увеличиваясь до ~ 600 м на высоте 1,3 км. Первый уровень соответствует высоте примерно 25 м, а последний – 12 км (200 гПа).

Антропогенные эмиссии газов и аэрозолей заданы на основе годовых данных кадастра ЕМЕП для 2008 г. с исходным разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ [14], биогенные эмиссии в данной версии не рассчитываются.

Перед использованием в XTM CHIMERE выходные данные COSMO-Ru7 переводятся в обычные прямоугольные координаты. В настоящее время система краткосрочного прогноза погоды COSMO-Ru7 использует версию 5.00 модели COSMO и версию

препроцессинга 2.00. Область прогноза COSMO-Ru7 составляет 700×620 узлов с шагом 7 км, расчет ведется для 40 вертикальных уровней [10]. В модели COSMO-Ru7 используется сдвинутая система географических координат [1, 10] и координатная сетка, в которой экватор проходит через область прогноза, а нулевой меридиан совпадает с центральным меридианом в этой области. Такое задание координат позволяет избежать проблем, связанных со сближением меридианов вблизи полюсов, и обеспечивает небольшое изменение шага по сетке на всей области прогноза. В используемой версии модели, например на широте Москвы, ячейка сетки $0,0625^\circ \times 0,0625^\circ$ имеет стороны $\sim 7 \times 7$ км.

Прогностические поля метеорологических параметров рассчитываются на суперкомпьютере «Торнадо» обычно до 8–9 ч (мск.), после чего весь набор необходимых прогностических метеоданных в GRIB-файлах копируется на персональную рабочую станцию на базе процессора Intel Core i3-2100. Время счета концентраций на трое суток вперед (в режиме параллельных вычислений), включая интерполяцию метеорологических полей в прямоугольную систему координат, занимает около 1,5 часов машинного времени.

2. Показатели качества модельных расчетов концентрации CO, NO₂, PM₁₀ вычислительного комплекса CHIMERE/COSMO-Ru7

Важно отметить, что модельный комплекс CHIMERE/WRF-ARW в последние пять лет подвергался многоплановому тестированию на данных измерений ГПБУ «Мосэкомониторинг» в 2011–2014 гг. в широком диапазоне метеорологических условий. Это позволило получить представление о качестве расчетов концентраций различных загрязняющих веществ и установить количественные показатели ошибок модельных прогнозов для г. Москвы в предшествующей конфигурации XTM [2–4].

2.1. Методика сравнений

Сравнения расчетных концентраций загрязняющих веществ CHIMERE/COSMO-Ru7 по аналогии с ранними работами [2–4] проведены с данными измерений на автоматизированных станциях

контроля загрязнения (АСКЗА) «Мосэкомониторинг». Модельные концентрации для станций определялись методом билинейной интерполяции. Здесь приводятся результаты сравнений по семи АСКЗА, расположенных в разных частях города, включая Зеленоград (рис. 1). Выбранные станции – «городского типа», находятся на удалении от прямых источников выбросов.

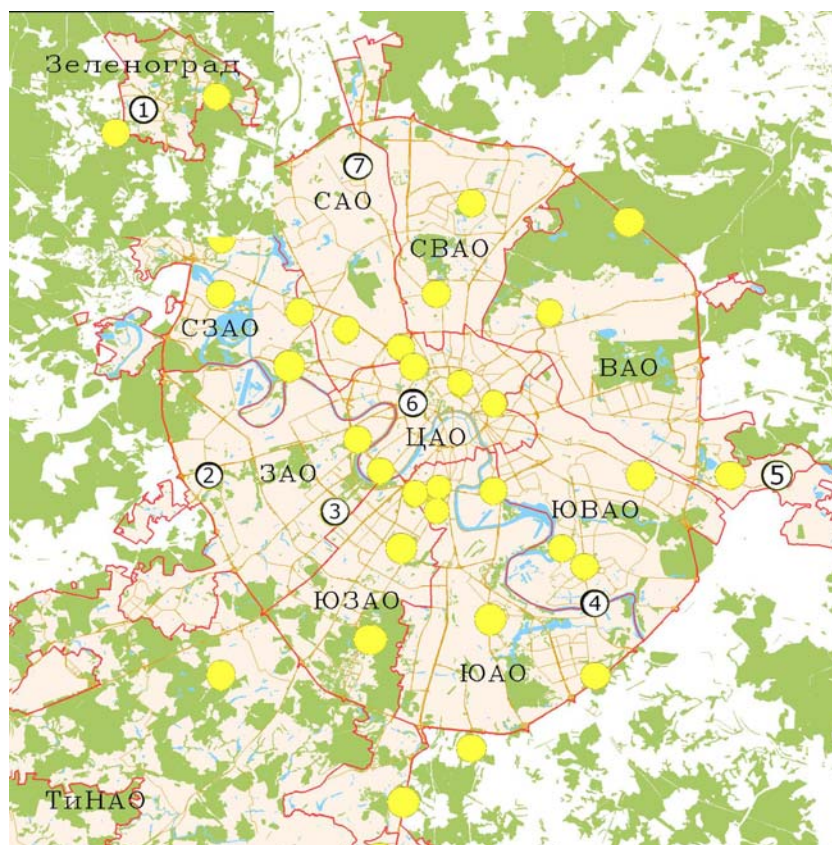


Рис. 1. Станции мониторинга «Мосэкомониторинг», данные измерений выделенных черным пунктом использованы для анализа (1 – Зеленоград, 2 – Толбухина, 3 – МГУ, 4 – Марьинский парк, 5 – Кожухово, 6 – Спиридоновка, 7 – Долгопрудная).

Поскольку оперативный расчет CHIMERE/COSMO-Ru7 проводился с начала 2015 г., для анализа использованы данные измерений в январе и феврале этого года. В этот период содержание основных загрязняющих веществ в воздухе Москвы соответствовало среднему многолетнему уровню; эпизодов значительного загрязнения городского воздуха, как и продолжительных НМУ (неблагоприятные для очищения приземного воздуха метеорологические условия), не отмечалось. Тестировались данные почасовых расчетов ХТМ на 24–48 часов вперед от исходного срока.

Ниже кратко обсудим результаты сравнений модельных и измеренных на АСКЗА концентраций трех веществ, в зимнее время дающих основной вклад в загрязнение приземного воздуха мегаполиса.

2.2. Оксид углерода (СО)

Максимальные суточные концентрации СО в январе-феврале 2015 г. были небольшими: на анализируемых АСКЗА изменялись от 460 до 860 $\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$, что соответствует 0,1–0,2 ПДК_{м.р.} (ПДК_{м.р.} = 5 $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$). Это показано на рис. 2 а, где представлены также статистические показатели модельных отклонений максимальных и усредненных за сутки концентраций СО (рис. 2 б, в). Здесь и ниже «отклонение» – разность между модельным расчетом CHIMERE/COSMO-Ru7 и измерением концентрации. Видно, что медиана отклонений максимальных за сутки концентраций находится на всех АСКЗА в пределах $\pm 150 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$ (рис. 2 б). Половина модельных ошибок (боксы 25–75 %) суточного максимума СО для большей части станций находится в интервале $\pm 300 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$, а модельных ошибок средней за сутки концентрации $\pm 200 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$ (что соответствует 6–7 % ПДК). Обращают на себя внимание наименьшие отклонения на АСКЗА Зеленоград как свидетельство достаточно высокой успешности расчета усредненной за сутки концентрации СО на «фоновой» территории (рис. 2 в). Имеющее место небольшое занижение суточных максимумов концентраций указывает на недооценку эмиссий СО в этом районе. Очевидно с той же проблемой связано систематическое занижение концентраций СО на АСКЗА Долгопрудный (на 100–300 $\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$), оно характерно и

для других, не рассматриваемых здесь станций в северной части города. По-видимому, используемые в расчетах эмиссии ЕМЕР (2008) недостаточно полно учитывают степень урбанизации в северном секторе Москвы и то обстоятельство, что автотранспорт – главный источник загрязнения воздуха в городе – сегодня практически равномерно «распределен» по территории мегаполиса.

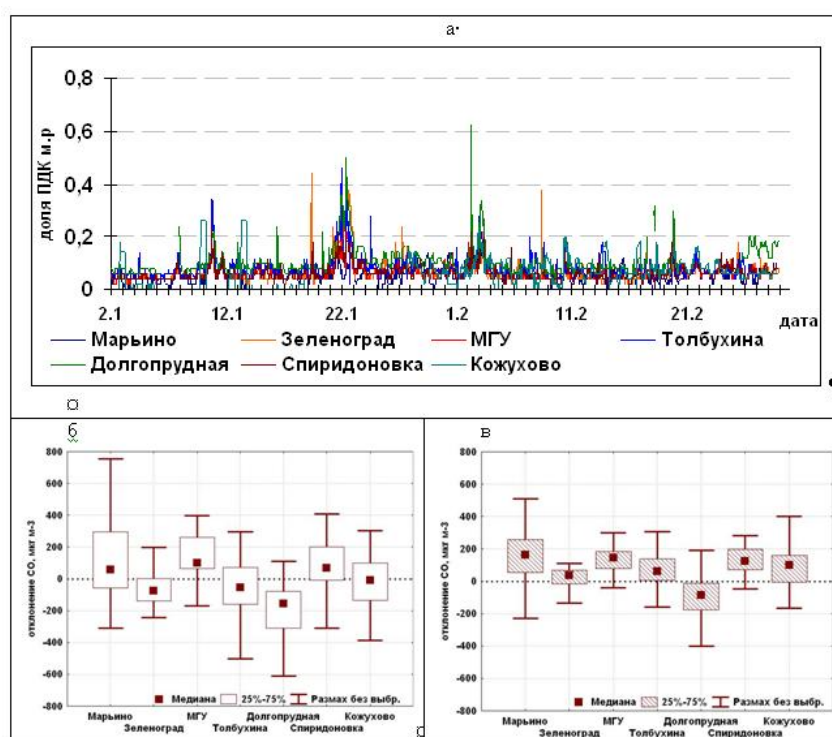


Рис. 2. Временной ход концентраций CO в долях ПДКм.р. на АСКЗА (а); статистические показатели отклонений модельных расчетов от измеренных максимальных суточных (б) и средних суточных (в) концентраций CO. Январь-февраль 2015 г.

Принимая во внимание, что названные выше модельные ошибки лишь немного превышают погрешность измерений CO, а также учитывая преобладающий низкий уровень CO в Москве,

модельные расчеты CO в технологии CHIMERE/COSMO-Ru7 следует признать удовлетворительными.

2.3. Диоксид азота (NO₂)

Диоксид азота образуется в основном из выбросов автотранспорта NO, т. е. является вторичным загрязнителем воздуха. Максимальные суточные концентрации NO₂ в январе-феврале 2015 г. на рассматриваемых АСКЗА достигали в отдельные дни 60–80 мкг·м⁻³ (рис. 3 а), что соответствует 0,3–0,45 ПДК_{м.р.} (ПДК_{м.р.} = 200 мкг·м⁻³). Можно заметить, что загрязнение воздуха диоксидом азота в долях ПДК значительно больше, чем загрязнение угарным газом. Усредненная по семи станциям максимальная за сутки концентрация NO₂ составила по измерениям 57 мкг·м⁻³, по модельным расчетам CHIMERE/COSMO-Ru7 – 61 мкг·м⁻³, т. е. модельные расчеты близки к наблюдаемым на выбранных станциях.

Статистические показатели модельных отклонений максимальных и усредненных за сутки концентраций NO₂ представлены на рис. 3 б и 3 в. Для большей части станций модельные ошибки максимальных за сутки концентраций NO₂ незначительны, медиана отклонений – около 0, примерно половина отклонений (25–75 %) находится в пределах ± 20 мкг·м⁻³ (по абсолютной величине около 10 % ПДК_{м.р.}).

Ошибки расчетов усредненных за сутки концентраций NO₂ смещены в сторону положительных величин; половина отклонений (25–75 %) находится в интервале от –5 до 15 мкг·м⁻³. Наиболее завышенными модельные концентрации NO₂ (и максимальные, и усредненные за сутки) оказались на АСКЗА МГУ, что обусловлено локальными особенностями этого района мегаполиса – более низким уровнем наблюдаемых концентраций (рис. 3 а).

Следует отметить, что величины концентрации NO₂ в приземном воздухе Москвы так же успешно рассчитывались и в предыдущих конфигурациях CHIMERE (с метеомоделями MM5 и WRF-ARW) [2]. При этом заметим, что ошибки расчетов концентрации NO₂ по CHIMERE/COSMO-Ru7 сравнимы с погрешностями известных ХТМ, полученными в расчетах NO₂ для зарубежных европейских городов [20, 23].

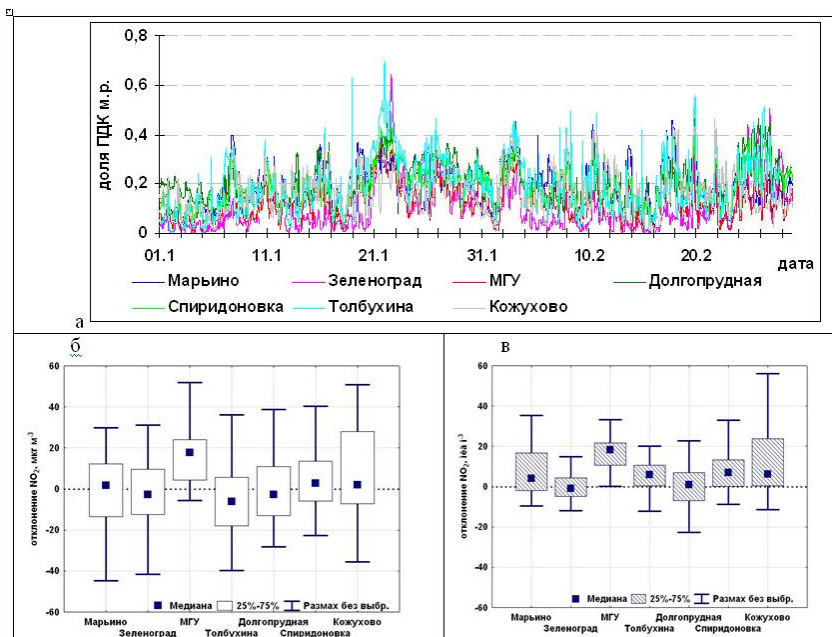


Рис. 3. Временной ход концентраций NO₂ в долях ПДК_{м.р.} на АСКЗА (а); статистические показатели отклонений модельных расчетов от измеренных максимальных суточных (б) и средних суточных (в) концентраций NO₂. Январь-февраль 2015 г.

2.4. Взвешенные вещества (PM₁₀)

По данным измерений PM₁₀ на АСКЗА установлено, что средние за сутки концентрации взвешенных частиц в январе-феврале 2015 г. были почти на 5–10 мкг·м⁻³ меньше наблюдавшихся в эти месяцы в предшествующие годы. За исключением станции в центре Москвы (АСКЗА Спиридоновка), где межгодовые изменения и колебания уровня PM₁₀ в последние 5 лет практически не изменились (рис. 4 а).

Единственный непродолжительный эпизод повышения уровня PM₁₀ (до 0,3–0,4 ПДК_{м.р.}) 21–22 января был обусловлен неблагоприятными для очищения приземного воздуха метеорологическими условиями (показано овалом на рис. 4 б).

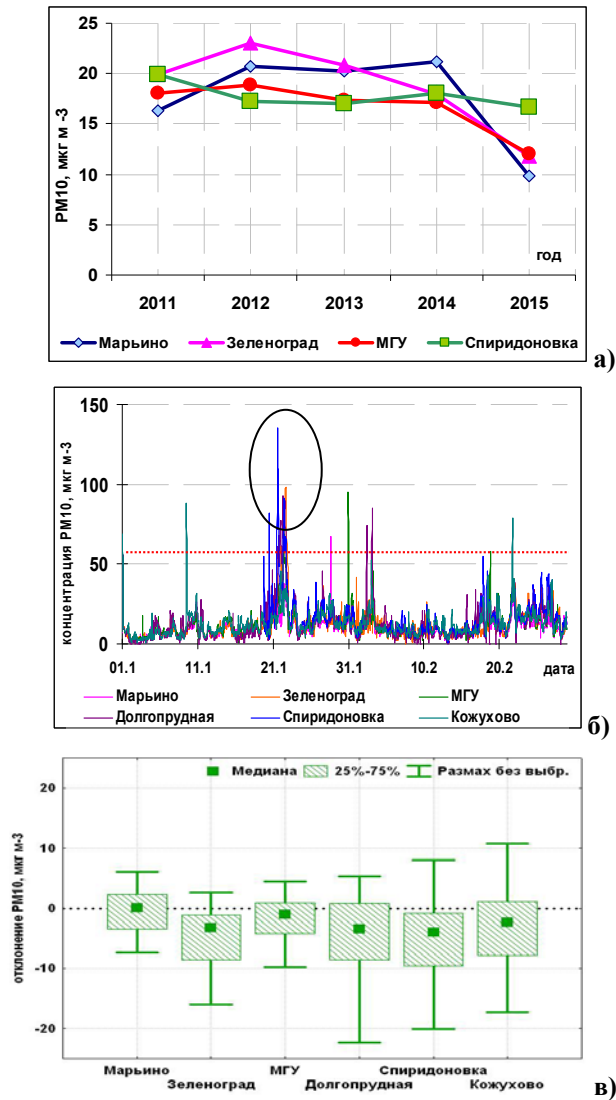


Рис. 4. Средние за два месяца (январь-февраль) концентрации PM_{10} в 2011–2015 гг. (а); временной ход концентраций PM_{10} (б); статистические показатели отклонений модельных расчетов от измеренных средних суточных концентраций PM_{10} (в). Январь-февраль 2015 г.

Следует заметить, что при оценке уровня загрязнения взвешенными частицами размером менее 10 мкм (PM_{10}) в силу специфики этого загрязнителя воздуха принято использовать среднюю за сутки концентрацию, по российским стандартам ПДКс.с. составляет $60 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$, по европейским – $50 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$.

По расчетам CHIMERE/COSMO-Ru7, в январе-феврале 2015 г. концентрация PM_{10} составила $9 \pm 5 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$, а по данным измерений на шести АСКЗА – $12 \pm 7 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$. На рис. 4 в показаны статистические характеристики модельных отклонений от измеренных концентраций. Видна общая тенденция незначительного занижения PM_{10} , медианы отклонений находятся в интервале от -5 до 0. Величины отклонений расчетных концентраций PM_{10} CHIMERE/COSMO-Ru7 сравнимы с модельными ошибками по результатам расчетов PM_{10} ряда химических транспортных моделей для европейских мегаполисов [27]. Наибольшие заниженные модельные расчеты получены для станций Спиридоновка и Долгопрудная (центр и север Москвы), что можно объяснить тем, что на этих станциях чаще, чем на других пунктах контроля PM_{10} , имеют место эпизодические повышения содержания мелких частиц в воздухе.

Небольшие преимущественно занижения модельных концентраций PM_{10} можно было бы признать систематическими, и, как показано в [2], с успехом применить линейную коррекцию для минимизации модельных погрешностей. Но в более ранних конфигурациях ХТМ CHIMERE расчетные концентрации PM_{10} для зимнего периода были большими, чем в этом году [2]. Указанные факты могут быть связаны не только с заменой в вычислительном комплексе CHIMERE/COSMO-Ru7 метеорологической модели и базы эмиссий (EMEP с 2007 на 2008), но и с преобладающим интенсивным рассеиванием в атмосфере в этом году. Большую конкретность причин смены знака модельных погрешностей в новой конфигурации ХТМ (CHIMERE/COSMO-Ru7) может, по-видимому, дать расширение периода тестирования.

Предварительное заключение, что замена в вычислительном комплексе метеорологической модели существенно не повлияла на качество модельных расчетов концентраций CO и NO₂ (показано выше), подтверждается результатами проведенного

экспериментального расчета по ХТМ CHIMERE с применением метеорологических данных двух моделей атмосферы – WRF-ARW и COSMO-Ru7 – в одном из самых значительных эпизодов загрязнения воздуха в Москве в последние годы. Некоторые результаты экспериментального расчета обсуждаются ниже.

3. Сравнения расчетов ХТМ CHIMERE с использованием метеорологических данных WRF-ARW и COSMO-Ru7 в эпизоде НМУ

Для эпизода высокого загрязнения приземного воздуха в Москве (19–22 ноября 2014 г.) проведены тестовые расчеты по ХТМ CHIMERE в двух различных конфигурациях. В первой конфигурации в качестве метеорологического “драйвера” использовалась модель WRF-ARW (v. 3.6) [26]. Метеорологические данные для сравнительного эксперимента рассчитывались на сетке 50×50 км² и 30 уровнях, охватывающих тропосферу и нижнюю стратосферу (до 50 гПа). Для расчетов характеристик пограничного слоя использован метод Меллора – Ямады – Жанжича [19] совместно с методом “Eta” (основанным на теории подобия Монина – Обухова), который применяется для описания физики приповерхностных процессов [18]. Модельные расчеты “стартовали” с начальных условий, заданных на основе данных глобальной модели LMDz –INCA [17]; эти же данные использовались для задания граничных условий.

В рамках второй конфигурации метеорологическим драйвером для ХТМ CHIMERE служила модель атмосферы COSMO-Ru7. Для описания турбулентности в ней используется схема Меллора – Ямады [24], аналогичная схеме турбулентности в WRF-ARW. Описание процессов на поверхности суши выполняется моделью деятельного слоя суши TERRA [15], которая представляет собой многоуровневую модель почвы, покрытой слоем растительности или снега [10, 16].

Особенности метеорологических характеристик в эпизоде.

В выбранном для сравнений эпизоде атмосферные условия определял блокирующий антициклон; с характерными для него нисходящими упорядоченными движениями и высокой температурной

инверсией оседания. Двое с половиной суток по данным измерений на телебашне Останкино сохранялись практически штилевые условия, что в темное время суток способствовало формированию мощных приземных инверсий температуры. Так, утром 20 ноября величина приземной инверсии достигла в окраинах московского мегаполиса 13–14 °С, в центре Москвы, благодаря отепляющему городскому влиянию [5], по данным микроволновых измерений профилей температуры прибором МТП-5 большую часть ночи нижняя граница инверсии колебалась вблизи уровня 100 м, но в ранние утренние часы инверсия достигла исключительно редко наблюдаемой в центре города величины 8 °С. При таком состоянии атмосферного пограничного слоя (АПС) уровень СО и РМ₁₀ повысился по сравнению с фоном примерно в 2 раза (малые овалы на рис. 5).

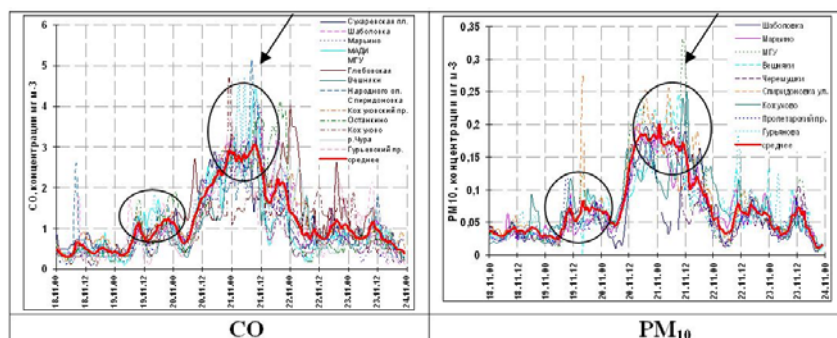


Рис. 5. Измеренные концентрации СО (слева) и РМ₁₀ (справа), мг м⁻³, на АСКЗА (www.mosecom.ru) 18–23 ноября 2014 г.

В ночь на 21 ноября при наличии приземной инверсии на окраинах города величиной 8–9 °С в центре Москвы нижняя граница инверсии температуры удерживалась на высоте 50 м и была слабее загородной почти в 2 раза.

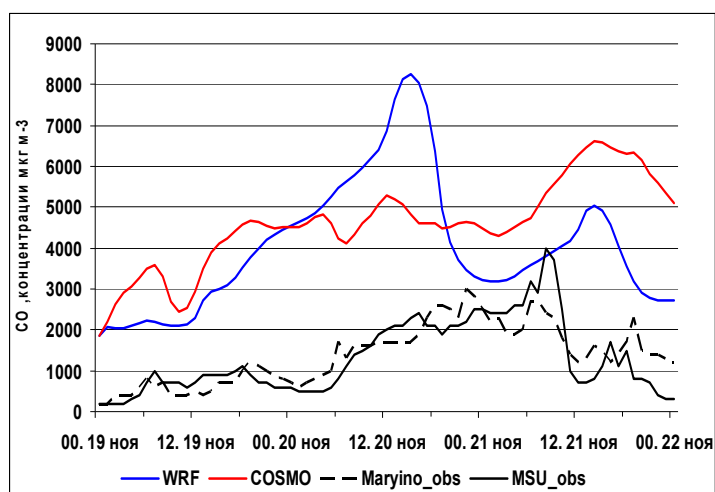
Как ни мала, казалось бы, скорость переноса в АПС 1–3 м·с⁻¹, но при НМУ поле загрязнения, по-видимому, очень чувствительно к процессам внутригородского переноса. Их проявление и орографические эффекты в эпизоде самых интенсивных НМУ способствовали формированию пиковых концентрации СО и РМ₁₀ днем

21 ноября в районе ст. МГУ, (на рис. 5 показано стрелками). Отметим, что наибольшие концентрации СО наблюдались на приагостральных станциях ($5-7 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$), в жилых районах было зафиксировано $3-4 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ (www.mosecom.ru). Концентрации PM_{10} достигали величин почти в 10 раз больше обычно наблюдаемых в это время года ($0,25-0,42 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$, местами $0,6 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$). По окончании эпизода (вечером 22.11) при усилении ветра в АПС и появлении низкоуровневого струйного течения с локальным максимумом $11-12 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ в слое 300–400 м практически одновременно концентрации СО и PM_{10} стали резко уменьшаться.

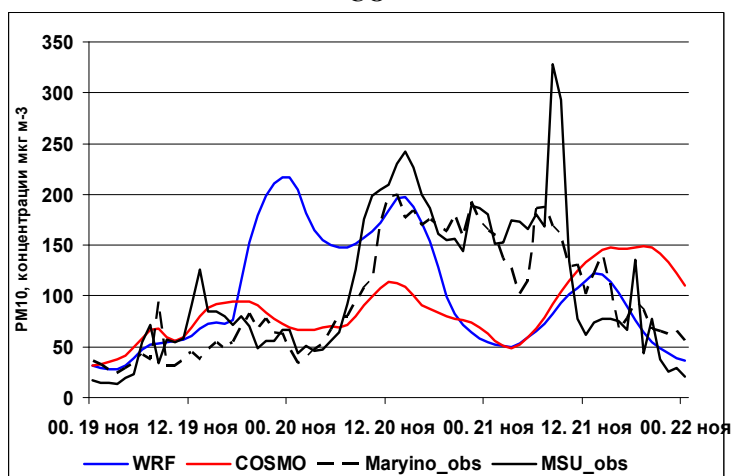
Короткопериодные колебания концентраций загрязняющих веществ, определяемые НМУ, тесно коррелированы; коэффициент корреляции часовых концентраций СО и PM_{10} составил 0,9 (АСКЗА Марьино).

Сравнения модельных расчетов с данными измерений. На рис. 6 представлены временные ходы приземной концентрации СО и PM_{10} , измеренные на станциях и рассчитанные CHIMERE с двумя метеорологическими драйверами (COSMO-Ru7 и WRF-ARW). Обращают на себя внимание а) явное завышение моделями концентрации СО: в эпизоде по модели больше ПДК_{м.р.} при фактическом максимальном уровне $0,6-0,7 \text{ ПДК}_{\text{м.р.}}$, б) в общем удовлетворительные модельные расчеты массовой концентрации взвешенных частиц PM_{10} .

Нельзя не заметить (рис. 6 а), что модельный расчет СО уже на первых шагах показывает значительно завышенные «фоновые» концентрации – около $2 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ – при наблюдаемом уровне около $0,4 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$. Отметим, что при фактическом приросте СО в пике НМУ примерно на $3 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ модельные расчеты показали приращение концентрации СО на $4,5-6 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$, при этом рассчитанный CHIMERE/COSMO-Ru7 максимум совпал по величине с концентрацией СО в одном из самых загрязненных районов города (транспортная АСКЗА Нижняя Масловка). По-видимому, завышенные модельные концентрации СО «обеспечивали» термическая устойчивость и слабый перенос метеорологических моделей (монотонно CHIMERE/COSMO-Ru7, со сдвигом на вечернее время CHIMERE – WRF).



CO



PM₁₀

Рис. 6. Временной ход измеренных и модельных концентраций CO и PM₁₀ (мг·м⁻³) на АСКЗА Марьино и МГУ 19–21 ноября 2014 г. Модельные расчеты концентрации: синяя и красная линии; измерения: жирная черная линия – Марьино, штриховая черная – МГУ.

Очевидно, и модельные смещения времени максимумов в эпизоде связаны с классическими описаниями модельного суточного хода, а в наблюдавшейся динамике загрязнения приземного воздуха значительную роль могли сыграть внутригородские циркуляции под воздействием городского острова тепла и особенностей ландшафта. Последнее убедительно иллюстрирует пики CO и PM_{10} на ст. МГУ около полудня (стрелки на рис. 5).

Модельные расчеты PM_{10} в течение трех суток 19–21 ноября указывали на превышение ПДК_{с.с.} ($60 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$), что практически совпадает с данными мониторинга. Надо подчеркнуть, что в отдельные часы эпизода (с 20.11 до 12 ч 21.11) в приземном воздухе Москвы концентрации PM_{10} увеличивались до величин, в это время года ранее не наблюдавшихся. Следует признать, что в расчетах временной динамики PM_{10} CHIMERE/COSMO-Ru7 оказалась немного точнее CHIMERE – WRF.

Заключение

С участием сотрудников Института прикладной физики РАН (Нижний Новгород) в Гидрометцентре России разработана технология расчетов полей концентраций загрязняющих веществ ХТМ CHIMERE с использованием метеорологических данных модели атмосферы COSMO-Ru7.

Результаты тестирования модельных расчетов CHIMERE/COSMO-Ru7 на данных наблюдений в январе-феврале 2015 г., а также в эпизоде экстремального загрязнения, обусловленного аномалией крупномасштабной циркуляции и локальными НМУ в ноябре 2014 г., указывают на то, что смена метеорологического блока существенно не повлияла на расчеты концентраций CO , NO_2 и PM_{10} . Делается вывод о целесообразности внедрения оперативной технологии CHIMERE/COSMO-Ru7, что обеспечит надежность и устойчивость оперативного прогнозирования качества воздуха в московском регионе.

В ближайшей перспективе предполагается продолжить разработки по интерпретации модельных расчетов применительно к мегаполису с учетом погрешностей задания эмиссий и оценке качества модельных прогнозов концентраций загрязняющих веществ.

Список использованных источников

1. 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.
2. Зарипов 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.
3. 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.
4. 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.
5. Кузнецова И.Н., Кадыгров Е.Н., Миллер Е.А., Нахаев М.И. Характеристики температуры в нижнем 600-метровом слое по данным дистанционных измерений приборами МТП-5 // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25, № 10. – С. 877–883.
6. Кузнецова И.Н., Коновалов И.Б., Глазкова А.А., Березин Е.В., Бикманн М., Шульце Е.-Д. Оценка вклада трансграничного переноса в загрязнение атмосферы в Дальневосточном регионе на основе применения химическо-транспортной модели // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 3. – С. 17–29.
7. Кузнецова И.Н., Коновалов И.Б., Глазкова А.А., Нахаев М.И., Зарипов Р.Б., Лезина Е.А., Звягинцев А.М., Бикманн М. Наблюдаемая и рассчитанная изменчивость концентрации взвешенного вещества (PM_{10}) в Москве и Зеленограде // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 3. – С. 48–60.
8. Нахаев М.И., Березин Е.В., Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н. и др. Экспериментальные расчеты концентрации PM_{10} И СО комплексом моделей CHIMERE и COSMO-Ru7 // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 25, № 6. – С. 485–492.
9. Ревокатова 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 МГУ, сер. География. – 2012. – № 4. – С. 25–33.

10. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Блинов Д.В. Технологическая линия системы краткосрочных мезомасштабных оперативных прогнозов погоды COSMO-Ru с шагом сетки 7 км // Труды Гидрометцентра России. – 2012. – Вып. 347. – С. 61–80.
11. Суркова Г.В., Блинов Д.В., Кирсанов А.А., Ревокатова А.И., 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.
12. Суркова Г.В., Кирсанов А.А., Кислов А.В., Ревокатова А.П., Ривин Г.С. Прогноз концентраций загрязняющих веществ с помощью объединенной модели COSMO-Ru7-ART // Труды Гидрометцентра России. – 2014. – Вып. 352. – С. 115–138.
13. CHIMERE chemistry – transport model, <http://www.lmd.polytechnique.fr/chimere/>, Institut Pierre Simon Laplace, 2001–2014.
14. EMEP/CEIP, Present state of emissions as used in EMEP models, available at: http://www.ceip.at/webdab_emepdatabase/emissions_emepmodels/, 2014.
15. Doms G., Heise E. et al. A Description of the Nonhydrostatic Regional Model LM. Part 2: Physical Parametrization. – 2007. – www.cosmo-model.org
16. Doms G., Shättler U., Schraff C. A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model, User's Guide. – 2008. – www.cosmo-model.org
17. Folberth G.A., Hauglustaine D.A., Lathière J., Brocheton F. Interactive chemistry in the Laboratoire de Météorologie Dynamique general circulation model: model description and impact analysis of biogenic hydrocarbons on tropospheric chemistry // Atmos. Chem. Phys. – 2006. – Vol. 6. P. 2273–2319. – doi:10.5194/acp-6-2273-2006.
18. Janjic Z.I. The step-mountain coordinate: physical package // Mon. Weather Rev. – 1990. – Vol. 118. – P. 1429–1443.
19. Janjic Z.I. The Step-mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes // Mon. Weather Rev. – 1994. – Vol. 122. – P. 927–945.
20. Knote C., Brunner D., Vogel H., Allan J. et al. Towards an online-coupled chemistry-climate model: evaluation of trace gases and aerosols in COSMO-ART // Geoscientific Model Development. – 2011. – Vol. 4. – P. 1077–1102.
21. Kononov I.B., Beekmann M., D'Anna B., George C. Significant light induced ozone loss on biomass burning aerosol: Evidence from

chemistry-transport modeling based on new laboratory studies // *Geophysical Research Letters*. – 2012. – Vol.39. – doi:10.1029/2012GL052432.

22. *Konovalov I.B., Berezin E.V., Ciais P., Broquet G., Beekmann M., Hadji-Lazaro J., Clerbaux C., Andreae M.O., Kaiser J.W., Schulze E.-D.* Constraining CO₂ emissions from open biomass burning by satellite observations of co-emitted species: a method and its application to wildfires in Siberia // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2014. – Vol. 14. – P. 10383–10410.

23. *De Meij, Gzella A., Cuvelier C., Thunis P., Bessagnet B., Vinuesa J.F., Menut L., Kelder H.M.* The impact of MM5 and WRF meteorology over complex terrain on CHIMERE model calculations // *Atmos. Chem. Phys.* – 2009. – Vol. 9. – P. 6611–6632.

24. *Mellor G.L., Yamada T.* Development of turbulence closure model for geophysical fluid problems // *Rev. Geophys. Space Phys.* – 1982. – Vol. 20. – P. 851–875

25. *Menut L., Bessagnet B., Khvorostyanov D., Beekmann M., Blond N., Colette A., Coll I., Curci G., Foret G., Hodzic A., Mailler S., Meleux F., Monge J.-L., Pison, I., Siour G., Turquety S., Valari M., Vautard R., Vivanco M.G.* CHIMERE 2013: a model for regional atmospheric composition modelling // *Geosci. Model Dev.* – 2013. Vol. 6. – P. 981–1028. – doi:10.5194/gmd-6-981-2013.

26. *Skamarock W.C., Klemp, J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Wang W., Powers J.G.* A description of the Advanced Research WRF Version 2 // *NCAR Tech Notes-468+STR*, 2005.

27. *Vautard R., Builtjes P.H.J., Thunis C. Cuvelier, Bedognie M., Bessagnet B., Honoré C., Mousiopoulos N., Pirovano G., Schaap M., Sterni R., Tarrason L.P.* Windj Evaluation and intercomparison of Ozone and PM10 simulations by several chemistry transport models over four European cities within the CityDelta project // *Atmospheric Environment*. – 2007. – Vol. 41. – P. 173–188.

28. *Vogel H., Förstner J., Vogel B., Hanisch T., Mühr B., Schöttler U., Schad T.* Time-lagged ensemble simulations of the dispersion of the Eyjafjallajökull plume over Europe with COSMO-ART // *Atmos. Chem. Phys.* – 2014. – Vol. 14. – P. 7837–7845.

29. *Vogel B., Vogel H., Baumner D., Bangert M., Landgren K., Rinke R., Stanelle T.* The comprehensive model system COSMO-ART – Radiative impact of aerosol on the state of the atmosphere on the regional scale // *Atmos. Chem. Phys.* – 2009. – Vol. 9. – P. 8661–8680.

Поступила в редакцию 19.08.2015 г.