

УДК 551.510.411.3

Экспериментальные расчеты концентраций PM_{10} и CO комплексом моделей CHIMERE и COSMO-RU7

М.И. Нахаев¹, Е.В. Березин², И.Ю. Шалыгина¹, И.Н. Кузнецова¹,
И.Б. Коновалов², Д.В. Блинов¹, Е.А. Лезина^{3*}

¹Гидрометцентр России

123242, г. Москва, Б. Предтеченский пер., 11–13

²Институт прикладной физики РАН

603950, г. Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46

³«Мосэкомониторинг»

119019, г. Москва, Новый Арбат, 11, стр. 1

Поступила в редакцию 28.01.2015 г.

Кратко описывается оригинальная технология расчетов и прогнозов полей концентраций загрязняющих веществ на основе химической транспортной модели (ХТМ). Ранее полученные с применением данных измерений в Московском регионе результаты тестирования расчетов ХТМ CHIMERE продемонстрировали их адекватность в случае использования ХТМ метеорологических данных модели WRF-ARW. Представлены экспериментальные расчеты ХТМ CHIMERE по метеорологическим данным модели COSMO-Ru7, обсуждаются первые результаты сравнения этих расчетов с данными мониторинга загрязнения атмосферы, а также с аналогичными расчетами, выполненными с помощью модели WRF-ARW для обычных и экстремальных условий загрязнения приземного воздуха.

Ключевые слова: моделирование загрязнения атмосферы, химическая транспортная модель CHIMERE, прогнозы COSMO-Ru7; modeling of air pollution, chemistry-transport model CHIMERE, COSMO-Ru7 forecasts.

Введение

В последние годы наблюдается интенсивное развитие и освоение химических транспортных моделей (ХТМ) для расчета концентраций воздушных загрязнений. Подробный обзор ХТМ, применяемых в Европе, дается в [1]. В качестве примера использования таких моделей можно отметить расчеты ХТМ EURAD (<http://db.eurad.uni-koeln.de/>), представленные в открытом доступе, для некоторых европейских столиц (в том числе для Москвы) и детально для отдельных регионов Германии. Кроме прогнозов, в оперативном режиме приводятся сравнения прогностических концентраций различных примесей с наблюдениями на станциях мониторинга.

В Московском регионе развитие сети мониторинга качества воздуха стимулировало разработку технологии численных расчетов концентраций загрязняющих веществ. В Гидрометцентре России совместно с Институтом прикладной физики РАН (Ниж-

ний Новгород) создан вычислительный комплекс на основе ХТМ CHIMERE и метеорологической модели WRF-ARW [2–5]. В последние годы в результате международного сотрудничества в рамках консорциума COSMO в Гидрометцентре России создан и функционирует вычислительный комплекс COSMO-Ru7–ART [6, 7], основанный на разработках и тестировании ХТМ участниками консорциума [8, 9].

Создание модельных комплексов, базирующихся на ХТМ CHIMERE и COSMO-Ru7–ART, нацелено в первую очередь на прогнозирование качества воздуха в регионе, а также на анализ возможных причин наблюдаемых эпизодов повышенного загрязнения атмосферы. Значительные усилия разработчиков направлены на адаптацию модельных расчетов к сетевым наблюдениям за содержанием загрязняющих веществ в мегаполисе. Тестирование модельных расчетов по данным непрерывных измерений ГПБУ «Мосэкомониторинг» (www.mosecom.ru) в широком диапазоне метеорологических условий, наблюдавшихся в 2012–2014 гг., позволило установить характерные особенности расчетов двух ХТМ и обнаружить связи ошибок модельных расчетов концентраций с ошибками прогноза метеорологических параметров [10]. По результатам тестирования получен вывод о перспективности комбинированного использования модельных расчетов двух вычислительных комплексов, а также о целесообразности выполнения

* Мурат Ислегалеевич Нахаев (muratmeteo@mail.ru); Евгений Васильевич Березин (e.berezin@appl.sci-ppov.ru); Ирина Юрьевна Шалыгина (shalygina@mecom.ru); Ирина Николаевна Кузнецова (muza@mecom.ru); Игорь Борисович Коновалов (konov@appl.sci-ppov.ru); Денис Викторович Блинов (denisblinov@ya.ru); Елена Александровна Лезина (LezinaEA@eco.mos.ru).

и анализа экспериментальных расчетов одной XTM (CHIMERE) с метеорологическими данными различных численных моделей атмосферы. Актуальность подобного рода исследований независимо подтверждается, в частности, результатами работы [11], где анализируются различия расчетов XTM CHIMERE и расчетов с использованием «родственных» мезомасштабных моделей атмосферы WRF и MM5. Авторами утверждается, что применение различных описаний пограничного слоя в названных моделях атмосферы в разные сезоны приводит к существенным различиям в результатах расчетов массовой концентрации взвешенных частиц PM_{10} (от англ. particulate matter, аэродинамический диаметр менее 10 мкм).

Численные модели являются достаточно универсальным и удобным инструментом для изучения и оценки влияния отдельных параметров (параметризации) на результаты, позволяющие в итоге выбрать наиболее оптимальные для конкретной задачи параметризации (или конфигурации) моделей. XTM CHIMERE чаще используют в паре с моделью WRF, так как обе модели находятся в открытом доступе.

С учетом вышесказанного и ввиду того, что сегодня в Гидрометцентре России базовой моделью прогноза погоды является модель атмосферы COSMO-Ru7 (www.meteoinfo.ru), позволяющая получать оперативные прогнозы метеорологических характеристик, необходимых для расчетов XTM, возникла потребность разработки технологии расчетов полей концентраций загрязняющих веществ по модели CHIMERE с использованием в качестве исходных метеорологических данных расчеты модели COSMO-Ru7. Интеграция этих моделей призвана обеспечить устойчивость и оперативность расчетов, а также возможность детального изучения и оценки влияния отдельных параметризаций различных процессов, учитываемых в XTM, на получаемые результаты. Кроме того, данная технология не требует привлечения дополнительных мощных вычислительных ресурсов: расчет метеорологических характеристик производится COSMO-Ru7 в «рутинном» режиме (независимо от задачи расчета загрязнения атмосферы) на суперкомпьютере «Торнадо», в то время как расчет концентраций загрязнений по XTM CHIMERE с усвоением данных COSMO-Ru7 осуществляется на персональной рабочей станции.

В настоящей статье представлены первые результаты экспериментальных расчетов вычислительного комплекса CHIMERE–COSMO-Ru7. Период тестирования содержит неординарный эпизод загрязнения приземного воздуха, обусловленный экстремальными метеорологическими условиями в регионе, анализу которых уделено особое внимание.

1. Модули вычислительного комплекса CHIMERE–COSMO-Ru7

Модель атмосферы COSMO-Ru7. С 2009 г. в Гидрометцентре России начала функционировать тех-

нология мезомасштабных гидродинамических прогнозов погоды для территории Центральной и Восточной Европы – COSMO-Ru7. Подробно описание модели представлено на ее сайте (<http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/>). В апреле 2011 г. решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и геологическим прогнозам Росгидромета модель атмосферы COSMO-Ru7 внедрена в оперативную практику в качестве базовой.

В модели COSMO-Ru7 применяется сдвинутая система географических координат [12, 13], т.е. 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 $0,0625 \times 0,0625^\circ$ имеет стороны $\sim 7 \times 7$ км, а $0,02 \times 0,02^\circ \sim 2,2 \times 2,2$ км.

Перед усвоением 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 [13].

Химическая транспортная модель CHIMERE. XTM CHIMERE – современная мезомасштабная химическая транспортная модель, обладающая открытым кодом [14, 15, см. также сайт модели: <http://www.lmd.polytechnique.fr/chimere/>]. Она предназначена для расчетов концентраций малых газовых и аэрозольных составляющих в нижней атмосфере на региональном и континентальном масштабах. CHIMERE учитывает наиболее важные процессы, определяющие пространственно-временные распределения концентраций малых примесей атмосферы, включая основные 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 того, в модели учтены основные процессы, обуславливающие 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 [14]. Эта модель в последние годы успешно применяется в исследованиях состава нижней атмосферы над территорией России [16–18].

2. Спецификации экспериментальных расчетов

Расчеты и прогнозы загрязнения атмосферы в Московском регионе выполнялись с использованием технологии вложенного домена. А именно: на первом этапе проводились расчеты с разрешением $0,5 \times 0,5^\circ$ для «континентального» домена, охватывающего часть Восточной Европы, включая большую часть европейской территории России (20–56° в.д., 48–66° с.ш.). Почасовые данные этих расчетов использовались в качестве граничных условий для расчетов, выполняемых с более высоким разрешением $0,25 \times 0,125^\circ$ для меньшего «регионального» домена, охватывающего часть Центрально-Европейского региона России (35–45,2° в.д., 53,55–58° с.ш.). Расчеты осуществлялись для 12 уровней по вертикали. Расстояние между уровнями увеличивалось по мере удаления от поверхности: первый уровень соответствовал высоте примерно 25 м, а последний – 12 км (200 гПа). Антропогенные эмиссии газов и аэрозолей заданы на основе данных кадастра ЕМЕП с исходным разрешением $0,5 \times 0,5^\circ$ [19], а биогенные эмиссии рассчитывались онлайн (в зависимости от метеорологических условий) с учетом данных и формулировок модели MEGAN [20].

Модельные расчеты, обсуждаемые в настоящей статье, «стартовали» 14 ноября 2014 г. с начальных условий, заданных на основе данных глобальной модели LMDz-INCA [21], эти же данные использовались для задания граничных условий. В эксперименте участвовали две различные конфигурации XTM CHIMERE. В первой конфигурации (уже апробированной в предыдущих исследованиях [2, 4, 5]) метеорологическим «драйвером» стала известная модель WRF-ARW (v. 3.6) [22]. Метеорологические данные были рассчитаны на сетке 50×50 км и 30 уровнях, охватывающих тропосферу и нижнюю стратосферу (до 50 гПа). Метод Mellor–Yamada–Janjic [23] применялся для расчетов характеристик пограничного слоя совместно с методом ETA (основанным на теории подобия Монина–Обухова) для описания физики приповерхностных процессов [24].

В рамках второй конфигурации метеорологическим драйвером для XTM CHIMERE служила модель атмосферы COSMO-Ru7. Для описания турбулентности в ней используется схема Mellor–Yamada [25] (аналогичная схема турбулентности заложена в WRF-ARW). Описание процессов на поверхности суши выполняется моделью деятельного слоя суши TERRA [26], которая представляет собой многоуровневую модель почвы, покрытой слоем растительности или снега [13, 27]. Прогностические поля метеорологических параметров рассчитываются на суперкомпьютере «Торнадо» обычно до 8:00–9:00 (по московскому времени), после чего весь набор необходимых прогностических метео данных в GRIB-файлах копи-

руется на персональную рабочую станцию на базе процессора Intel Core i3-2100. Время счета концентраций на 3 сут вперед (в режиме параллельных вычислений), включая интерполяцию метеорологических полей в прямоугольную систему координат, занимает около 1,5 ч машинного времени.

В описанной конфигурации CHIMERE–COSMO-Ru7 выполнены тестовые расчеты для оценки модельного воспроизведения горизонтальной неоднородности поля концентраций в мегаполисе и вертикального градиента концентрации загрязнений. На рис. 1, а представлены расчеты временной изменчивости приземной концентрации CO в трех пунктах на северо-западе (1), востоке (2) и юге Москвы (3), соответствующих различным ячейкам модельной сети, охватывающим городскую территорию (координаты пунктов: 1 – 37,37° в.д., 55,81° с.ш.; 2 – 37,87° в.д., 55,69° с.ш.; 3 – 37,62° в.д., 55,69° с.ш.). Измерения концентрации CO осуществлялись газоанализаторами K-100, имеющими относительную (паспортную) погрешность $\pm 20\%$ (<http://www.mosecom.ru/>). Видно, что различия концентрации CO между пунктами на первых шагах счета (03:00 19.11.2014) незначительны, со временем они увеличивались до 2–2,5 мг · м⁻³. Можно заметить, что модельные расчеты показывали практически во всем расчетном периоде наибольшие концентрации в расположенном в южном секторе пункте 3, что предположительно связано с особенностями поля эмиссий CO, используемого в CHIMERE [19]. На финише экспериментального счета (ночь 22.11.2014) под воздействием возрастания модельной скорости ветра неоднородность поля CO резко уменьшилась – различия концентрации между пунктами сократились до 0,5 мг · м⁻³. Важно отметить, что локальные колебания уровней CO высоко синхронизированы, т.е. временная динамика концентрации CO в большей степени обусловлена воздействием общих метеорологических факторов, в данной синоптической ситуации – скоростью и направлением переноса, а также термической устойчивостью.

Представляет интерес воспроизведение моделью динамики вертикального профиля концентраций загрязнений. Анализ экспериментальных расчетов показал, что изменения концентраций в нижнем слое находятся в согласии с физическими представлениями о процессах переноса в атмосферном пограничном слое (АПС) (рис. 1, б). Моделью воспроизводятся уменьшение концентрации с высотой и выравнивание концентраций во всем 100-метровом слое в часы максимального слоя перемешивания, имеет место привязка максимальных вертикальных градиентов концентрации ко времени ослабления вертикального обмена и пр.

Наблюдаемое смещение модельного максимума в эпизоде обусловлено ошибками модельного прогноза метео параметров и будет обсуждаться в разделе 4.

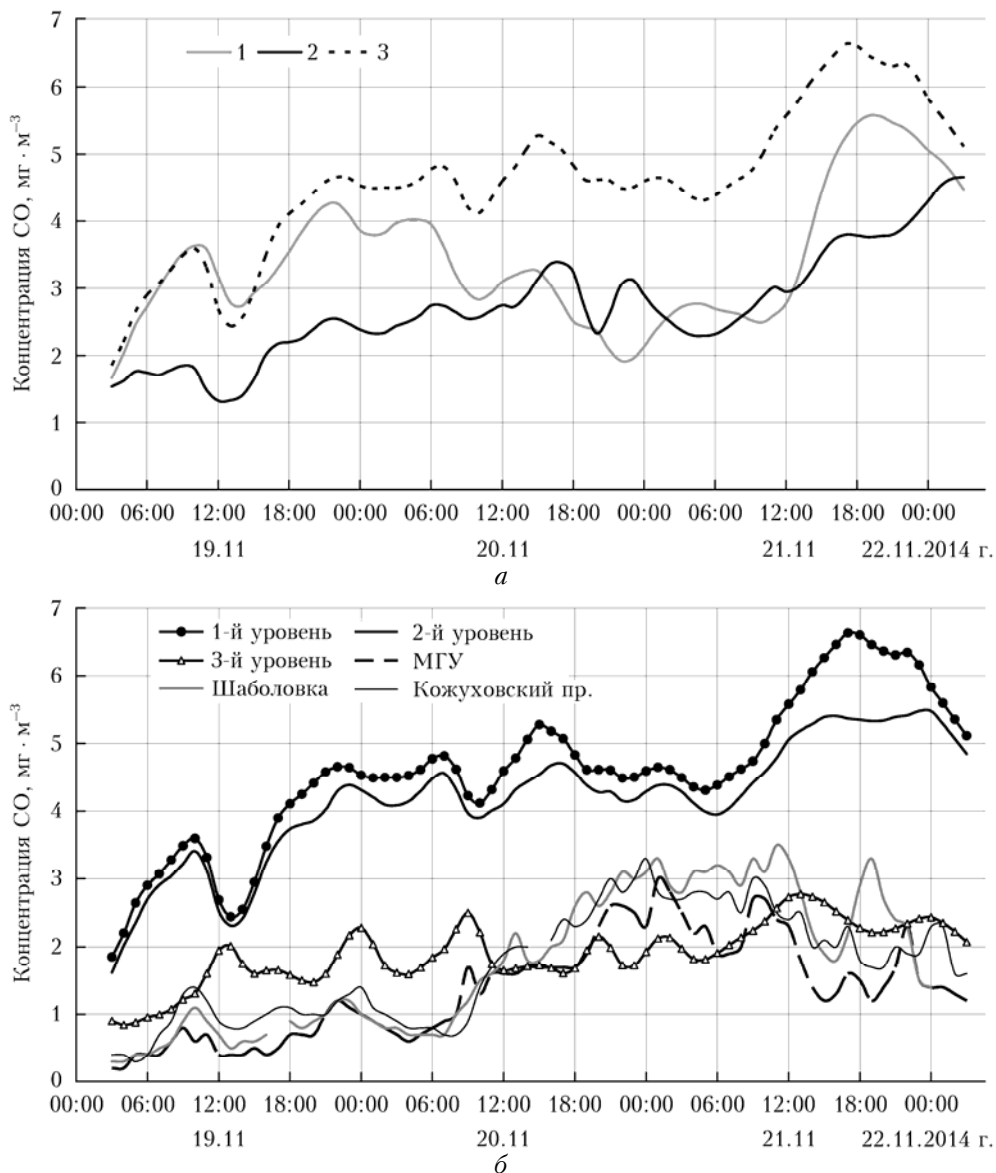


Рис. 1. Рассчитанная концентрация CO в трех пунктах: на северо-западе, востоке и в южном секторе Москвы (а); на модельных уровнях в пункте 3: 1-й – около 23 м; 2-й – 60 м; 3-й – 110 м; здесь же – измеренная CO на трех ближайших станциях мониторинга (б)

3. Особенности погодных условий и загрязнения приземного воздуха в период экспериментальных расчетов

Для анализа осознанно выбран период, включающий эпизод самых неблагоприятных для очищения приземного воздуха метеорологических условий (НМУ), 19–22 ноября 2014 г. Блокирующий антициклон с характерными для него нисходящими упорядоченными движениями и высокой приподнятой температурной инверсией оседания обусловил в октябре–ноябре в центре Европейской России аномально сухую погоду. Большую часть ноября (12–28.11) в АПС в Московском регионе преобладали слабые ветры со скоростью переноса $2\text{--}5\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. В основном облачная погода препятствовала радиационно-

му выхолаживанию, даже в ночные часы в нижнем 200–400-метровом подинверсионном слое, по данным микроволнового измерителя профиля температуры МТП-5 (<http://www.attex.ru/>), сохранялось перемешивание, оно препятствовало значительному накоплению загрязняющих веществ в приземном воздухе, что подтверждается измерениями на автоматических станциях контроля загрязнений атмосферы (www.mosecom.ru). Отметим, что представленные измерения PM_{10} были выполнены анализатором пыли ТЕОМ, имеющим допустимую погрешность $\pm 20\%$.

Резкое ухудшение ситуации утром 19 ноября, в частности увеличение концентраций CO и PM_{10} , было зафиксировано всеми городскими станциями мониторинга (рис. 2). В течение почти 4 сут (19–23.11) усредненная по станциям концентрация CO и PM_{10} (жирные линии на рис. 2) превышала обычный фон

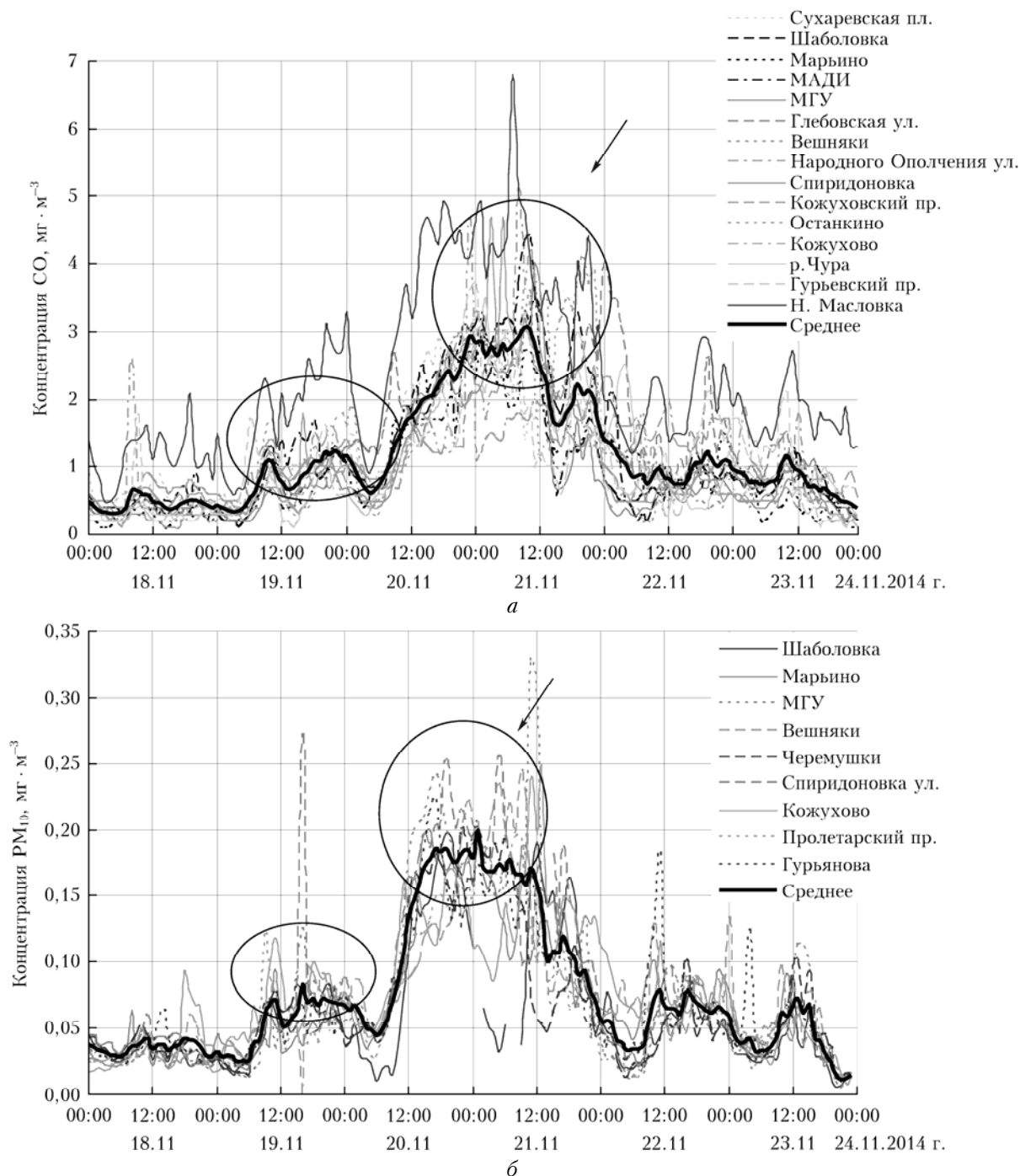
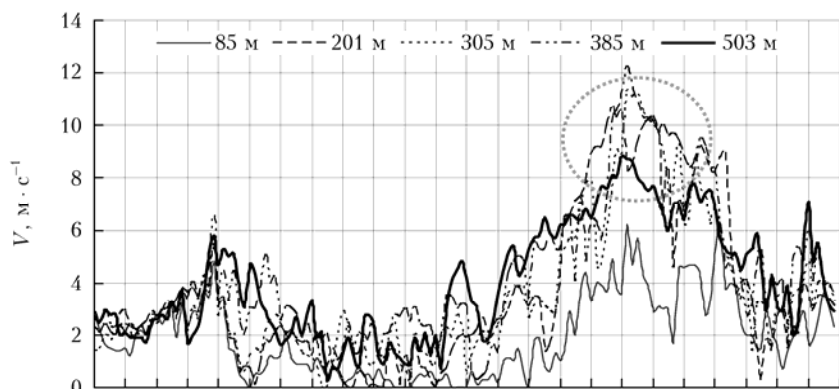


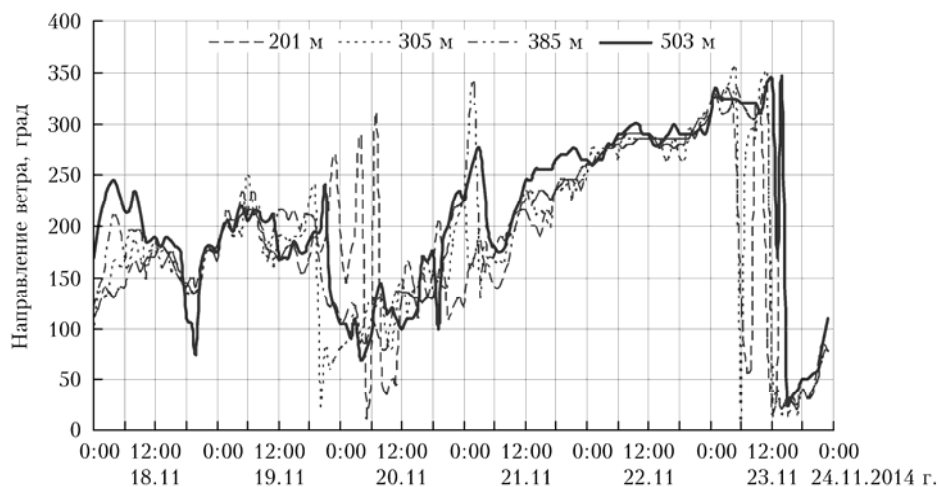
Рис. 2. Измеренные концентрации CO (а) и PM_{10} (б) на станциях Москвы (www.mosecom.ru) 18–24 ноября 2014 г.

в 2 раза, а в период максимального развития эпизода загрязнения (20–21.11) – в 4–7 раз. Предпосылки для накопления примеси в приземном воздухе возникли в первую очередь благодаря ослаблению переноса: ночью 19.11 по данным измерений на телебашне Останкино в нижнем 500-метровом слое скорость переноса уменьшилась до $1\text{--}3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Такие практически штилевые условия сохранялись двое с половиной суток (рис. 3, а). Необходимо подчеркнуть важную и определяющую роль температурной стратификации в штилевой ситуации, а именно: связь

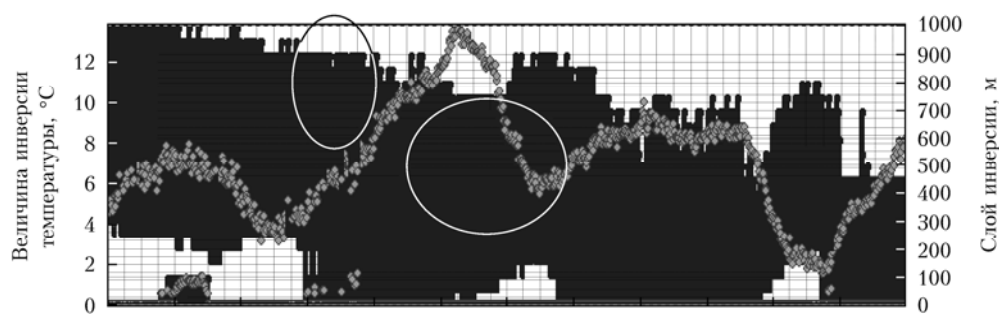
колебания уровня загрязнения приземного воздуха с изменениями высоты нижней границы температурной инверсии. Пока нижняя граница приподнятой инверсии температуры в городе и в пригороде держалась на высоте около 200 м (см. рис. 3, з), уровень загрязнения приземного воздуха был лишь немного повышенным (до вечера 19.11). Резкое увеличение концентраций (утром 20.11) и сохранение высокого загрязнения до полудня 21.11 синхронизированы с опусканием нижней границы инверсии температуры в центре города до 100 м, затем до 50 м



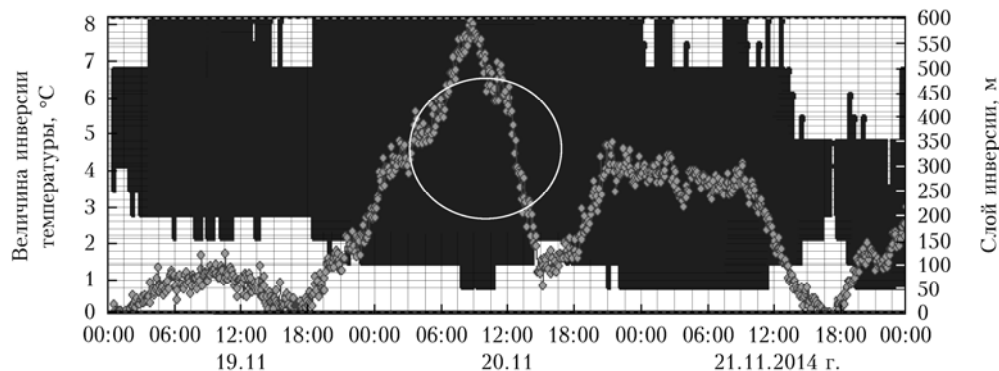
a



б



в



з

Рис. 3. Скорость (*a*) и направление (*б*) ветра в нижнем 500-метровом слое по данным телебашни Останкино 18–24.11.2014. Характеристики температурной инверсии по данным МТП-5 в северном пригороде (*в*) и в центре Москвы (*з*) в эпизоде экстремального загрязнения 19–21.11.2014 (черная заливка – слой инверсии, линии с маркерами – величина инверсии)

(в пригороде сформировалась приземная инверсия). Примечательно, что величины городской и загородной инверсий при максимальном развитии значительно отличались, отражая отепляющее городское воздействие [28]: утром 20.11 в пригороде инверсия достигла 14 °С, в центре Москвы она была на 5° слабее; ночью и утром 21.11 величина инверсии температуры составляла 8–10 °С, в Москве – около 4 °С.

Показательно, что интенсивный рост концентраций (20.11) начался одновременно со сменой направления ветра с юго-западного на юго-восточное (см. рис. 2, б). Как ни мала, казалось бы, скорость переноса в АПС 1–3 м·с⁻¹, видимо, при НМУ поле загрязнения в мегаполисе очень чувствительно к процессам внутригородского переноса. Их проявление и орографические эффекты в эпизоде самых интенсивных НМУ способствовали формированию пиковых концентраций СО и РМ₁₀ днем 21.11 в районе ст. МГУ, Воробьевы горы (на рис. 2 показаны стрелками).

При НМУ максимальные концентрации СО наблюдались на примагистральных станциях, повышаясь до 5–7 мг·м⁻³, в жилых районах было зафиксировано в максимуме 3–4 мг·м⁻³ (www.mosecom.ru). Концентрации РМ₁₀ увеличивались до 0,25–0,42 мг·м⁻³ (местами до 0,6 мг·м⁻³), что больше обычного в это время года почти в 10 раз. Максимальные в эпизоде уровни загрязнения (20.11 и до полудня 21.11) синхронизированы, как видно на рис. 2 и 3, со слабым переносом в АПС (1–3 м·с⁻¹) в сочетании с термической устойчивостью, т.е. с «отсутствием слоя перемешивания». Отметим, что при сохранении приземной инверсии на окраинах города величиной 8–9 °С (рис. 3, в) в центре Москвы 21.11 нижняя граница инверсии удерживалась на высоте 50 м (рис. 3, г) и была слабее загородной почти в 2 раза.

В эпизоде, когда повышение уровня загрязнения и короткопериодные незначительные колебания концентраций определялись НМУ, коэффициент корреляции часовых концентраций СО и РМ₁₀ составил $R = 0,9$ (ст. Марьино). Также практически одновременно, как при росте уровня загрязнения, концентрации обоих загрязнителей вечером 22.11 стали уменьшаться, тогда начало процесса очищения приземного воздуха определило усиление ветра в АПС и появление низкоуровневого струйного течения с локальным максимумом 11–12 м·с⁻¹ в слое 300–400 м (штриховой контур на рис. 3, а).

4. Сравнения модельных расчетов с данными наблюдений

На рис. 4 представлены временные ходы приземной концентрации СО и РМ₁₀, измеренные на станциях и рассчитанные CHIMERE с двумя метеорологическими драйверами (COSMO-Ru7 и WRF). Обращают на себя внимание явное завышение моделями концентрации СО (в эпизоде – больше предельно допустимой максимальной разовой концен-

трации (ПДК_{м.р.}) при фактическом максимальном уровне 0,6–0,7 ПДК_{м.р.}) и в общем удовлетворительные модельные расчеты массовой концентрации взвешенных частиц РМ₁₀.

Нельзя не заметить, что модельный расчет СО уже на первых шагах предполагает значительно завышенные «фоновые» концентрации – около 2 мг·м⁻³ – при наблюдаемом уровне около 0,4 мг·м⁻³. Отметим, что при фактическом приросте СО в пике НМУ примерно на 3 мг·м⁻³ модельные расчеты показали приращение концентрации СО на 4,5–6 мг·м⁻³, при этом рассчитанный CHIMERE–COSMO-Ru7 максимум совпал по величине с концентрацией СО в одном из самых загрязненных районов города (Н. Масловка, см. рис. 2). По-видимому, повышенные концентрации СО «обеспечивали» термическая устойчивость и слабый перенос метеорологических моделей (монотонно CHIMERE–COSMO-Ru7, со сдвигом на вечернее время CHIMERE–WRF). Вероятно, даже небольшие модельные погрешности расчета вертикального градиента температуры и прогноза скорости ветра могли привести к значительным ошибкам модельных расчетов концентраций. По нашим оценкам, полученным с привлечением данных наблюдений на телебашне Останкино и метеорологической мачте в Обнинске, для обеих моделей усредненные ошибки прогноза скорости ветра составляют в слое 100–200 м в зимний сезон 1–2 м·с⁻¹, летом – 0,5–1 м·с⁻¹. Можно отдельно отметить, что с увеличением высоты погрешности рассчитываемой скорости уменьшаются [10].

Очевидно, и модельные смещения времени максимумов в эпизоде связаны с классическими описаниями суточного хода в использованных моделях атмосферы, в то время как в наблюдавшейся динамике загрязнения приземного воздуха значительную роль могли сыграть внутригородские циркуляции (перенос) под воздействием городского острова тепла и особенностей ландшафта. Последнее особенно убедительно иллюстрирует пик СО (и РМ₁₀) около полудня на ст. МГУ (стрелки на рис. 2). Чтобы сделать окончательный вывод о главных причинах завышения уровня СО в ноябре, будут проведены модельные эксперименты с условиями интенсивного перемешивания в этом же сезоне.

Модельные расчеты массовой концентрации взвешенных частиц (РМ₁₀) в течение 3 сут 19–21 ноября указывали на превышение предельно допустимой среднесуточной концентрации (60 мкг·м⁻³), что соответствовало данным мониторинга. Особо следует подчеркнуть, что в эпизоде экстремального загрязнения (с 20.11 до 12:00 21.11) в приземном воздухе Москвы концентрации РМ₁₀ увеличивались до величин, в это время года ранее не наблюдавшихся. Не вдаваясь вновь в детали специфики описания внутрисуточного хода двух моделей, по совокупности признается, что CHIMERE–COSMO-Ru7 оказалась немного точнее CHIMERE–WRF в расчетах временной динамики РМ₁₀ под воздействием НМУ.

Примечательно, что модельный максимум и СО, и РМ₁₀ вечером 21.11 пришелся на время появления низкоуровневого струйного течения, обусловившего

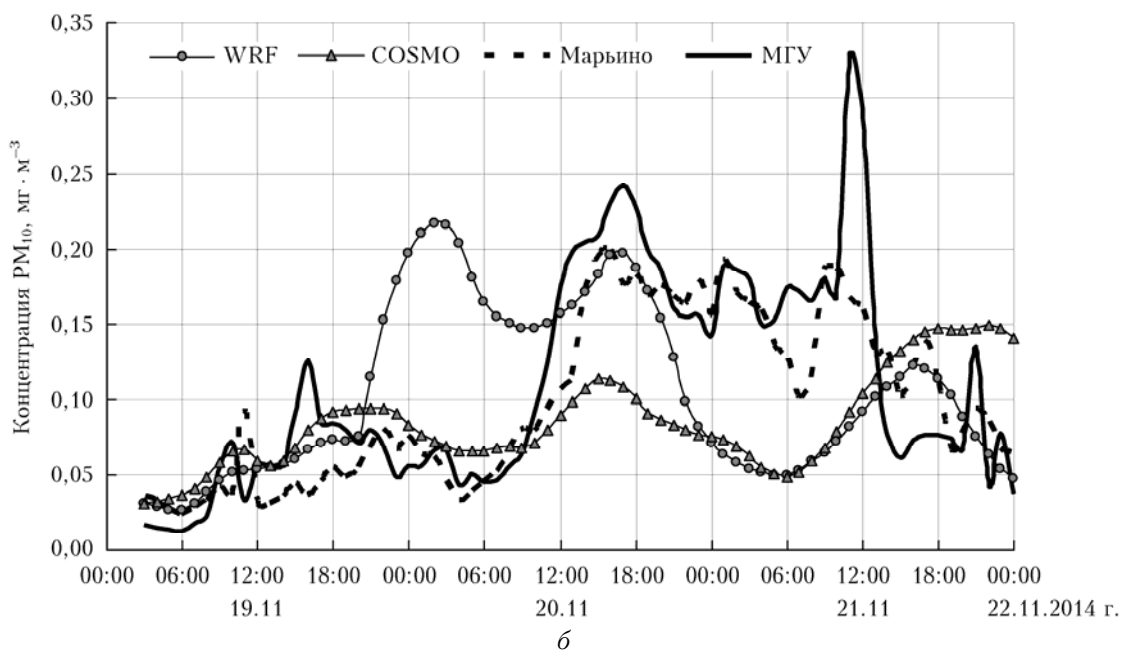
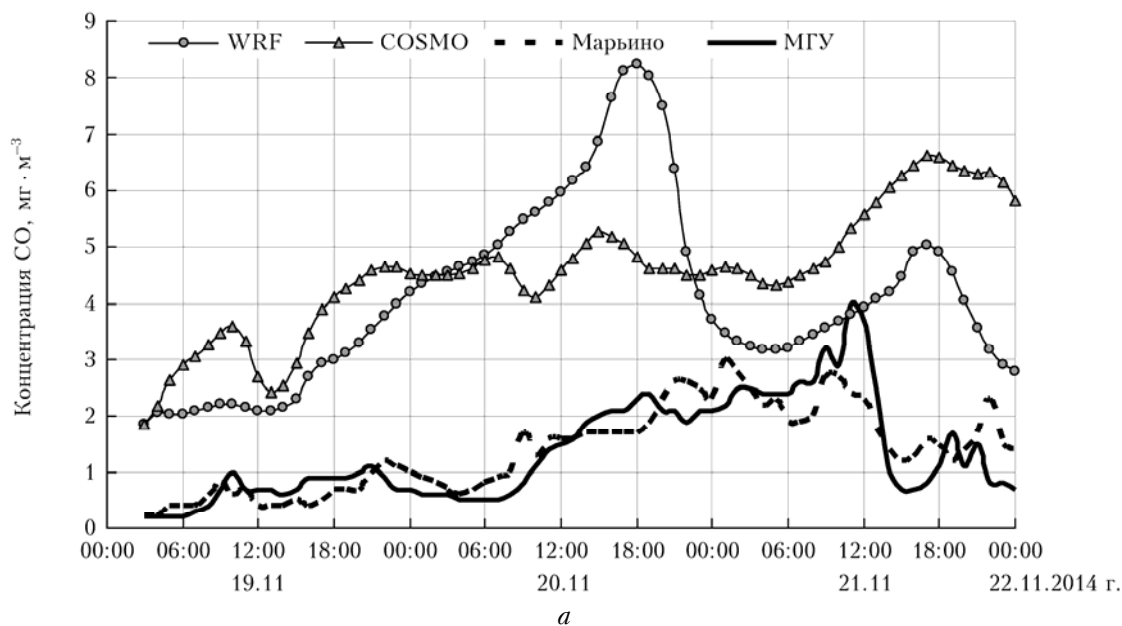


Рис. 4. Временной ход измеренных (линии без маркеров) и модельных концентраций CO (а) и PM₁₀ (б) на станциях Марьино и МГУ 19–22 ноября 2014 г.

за счет вертикального перемешивания снижение уровня загрязнения приземного воздуха. Однако мезомасштабные модели такое явление воспроизводят в редких случаях.

Заключение

В Гидрометцентре России в сотрудничестве с Институтом прикладной физики РАН создана технология расчетов полей концентраций загрязняющих приземный воздух веществ химической транспортной моделью CHIMERE на основе метеорологических данных базовой модели атмосферы COSMO-Ru7. Интеграция указанных двух моделей призвана обеспе-

чить надежность и устойчивость оперативного прогнозирования качества воздуха в Московском регионе.

Установлена адекватность расчетов CHIMERE как с метеорологическими данными COSMO-Ru7, так и с данными метеорологической модели WRF-ARW. Вместе с тем выявлены количественные различия между расчетами и измерениями, для установления причин которых требуются дополнительные численные эксперименты с использованием различных параметризаций процессов в АПС.

В целом полученные результаты тестирования модельных расчетов CHIMERE–COSMO-Ru7 на эпизоде экстремального загрязнения, обусловленного

аномалией крупномасштабной циркуляции и локальными НМУ, позволяют сделать вывод о целесообразности внедрения оперативной технологии CHIMERE–COSMO-Ru7 с последующей валидацией по данным продолжительного ряда измерений актуальных для города воздушных загрязнений.

Анализ предпосылок и условий формирования экстремального загрязнения приземного воздуха в ноябре 2014 г. в Москве подтвердил полученные на других эпизодах выводы о связи высоких уровней загрязнения с совокупным влиянием температурной инверсии и слабого переноса в пограничном слое. Показано, по данным измерений на станциях города, что при штиле и наличии подинверсионного слоя перемешивания толщиной от 100 м и более приземные концентрации CO и PM₁₀ повышаются без приближения к опасным для здоровья уровням.

1. Kukkonen J., Olsson T., Schultz D.M., Baklanov A., Klein T., Miranda A.I., Monteiro A., Hirtl M., Tarvainen V., Boy M., Peuch V.-H., Poupkou A., Kioutsioukis I., Finardi S., Sofiev M., Sokhi R., Lehtinen K.E.J., Karatzas K., San José R., Astitha M., Kallos G., Schaap M., Reimer E., Jakobs H., Eben K. A review of operational, regional-scale, chemical weather forecasting models in Europe // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12, N 1. P. 1–87.
2. 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 атмосф. и океана*. 2010. Т. 23, № 6. С. 485–492.
3. Кузнецова И.Н., Коновалов И.Б., Глазкова А.А., Нахаев М.И., Зарипов Р.Б., Лезина Е.А., Звягинцев А.М., Бикман М. Наблюдаемая и рассчитанная изменчивость концентрации взвешенного вещества (PM₁₀) в Москве и Зеленограде // *Метеорол. и гидрол.* 2011. № 3. С. 48–60.
4. 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 // *Метеорол. и гидрол.* 2011. № 4. С. 48–60.
5. Зарипов Р.Б., Коновалов И.Б., Глазкова А.А. Расчет концентраций загрязняющих веществ с использованием модели атмосферы WRF-ARW и химико-транспортной модели CHIMERE // *Метеорол. и гидрол.* 2013. № 12. С. 52–67.
6. Ревокатова А.П., Суркова Г.В., Курсанов А.А., Кислов А.В., Ривин Г.С. Прогноз загрязнения атмосферы Московского региона с помощью модели COSMO-ART // *Вестн. МГУ. Сер. 5*. 2012. № 4. С. 25–33.
7. Суркова Г.В., Блинов Д.В., Курсанов 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 атмосф. и океана*. 2014. Т. 27, № 1. С. 75–81.
8. Vogel H., Förstner J., Vogel B., Hanisch T., Mühr B., Schättler U., Schad T. Quasi-operational modeling of the Eyjafjallajökull volcanic ash episode with COSMO-ART at DWD // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13, N 5. P. 13439–13463.
9. 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. V. 9, N 22. P. 8661–8680.

10. Кузнецова И.Н., Шальгина И.Ю., Захарова П.В., Лезина Е.А., Коновалов И.Б. Опыт применения численных моделей с высоким пространственно-временным разрешением для прогноза процессов в атмосферном пограничном слое и загрязнения приземного воздуха // *Тезисы докл. VII Всерос. метеорол. съезда, 7–9 июля 2014 г.* Санкт-Петербург. 2014. С. 62.
11. De Meij A., 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. V. 9. P. 6611–6632.
12. Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: первый этап реализации и развития // *Метеорол. и гидрол.* 2010. № 8. С. 5–20.
13. 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*. 2012. № 347. С. 61–80.
14. 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 modeling // *Geosci. Model Dev.* 2013. V. 6, N 4. P. 981–1028. DOI: 10.5194/gmd-6-981-2013.
15. CHIMERE chemistry – transport model. Institut Pierre Simon Laplace, 2001–2014. URL: <http://www.lmd.polytechnique.fr/chimere/>
16. 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 // *Метеорол. и гидрол.* 2013. № 3. С. 17–29.
17. 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 // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39, iss. 17. DOI: 10.1029/2012GL052432.
18. Kononov I.B., Berezin E.V., Ciais P., Broquet G., Beekmann M., Hadji-Lazarou 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 // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14, N 19. P. 10383–10410.
19. EMEP/CEIP, Present state of emissions as used in EMEP models. 2014. URL: http://www.ceip.at/webdab_emeppdatabase/emissions_emeppmodels/
20. Guenther A., Karl T., Harley P., Wiedinmyer C., Palmer P.I., Geron C. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) // *Atmos. Chem. Phys.* 2006. V. 6, N 11. P. 3181–3210. DOI: 10.5194/acp-6-3181-2006.
21. Folberth G.A., Hauglustaine D.A., Lathière J., Broche-ton 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. V. 6, N 8. P. 2273–2319. DOI: 10.5194/acp-6-2273-2006.

22. 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.
23. Janjic Z.I. The Step-mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes // Mon. Weather Rev. 1994. V. 122, iss. 5. P. 927–945.
24. Janjic Z.I. The Step-mountain coordinate: Physical package // Mon. Weather Rev. 1990. V. 118, iss. 7. P. 1429–1443.
25. Mellor G.L., Yamada T. Development of turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. Space Phys. 1982. V. 20, iss. 4. P. 851–875.
26. Doms G., Forster J., Heise E., Herzog H.-J., Raschendorfer M., Schrodin R., Reinhardt T., Vogel G. A Description of the Nonhydrostatic Regional Model LM. Part 2: Physical Parametrization. 2007. URL: www.cosmo-model.org
27. Doms G., Shättler U., Schraff C. A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model, User's Guide. 2008. URL: www.cosmo-model.org
28. Кузнецова И.Н., Кадыгров Е.Н., Муллер Е.А., Нахаев М.И. Характеристики температуры в нижнем 600-метровом слое по данным дистанционных измерений приборами МТП-5 // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 10. С. 877–883.

M.I. Nakhaev, E.V. Berezin, I.Yu. Shalygina, I.N. Kuznetsova, I.B. Kononov, D.V. Blinov, E.A. Lezina. **Pilot calculations of PM₁₀ and CO concentrations with complex models CHIMERE and COSMO-Ru7.**

A brief description of an original chemistry-transport model (CTM) based on technology of modeling and forecasting air pollutant concentrations is presented. Earlier results of evaluation of CHIMERE CTM outputs against measurements in the Moscow region demonstrated the adequacy of the simulation when WRF-ARW meteorological data were used. Initial CHIMERE CTM simulations based on the COSMO-Ru7 meteorological model outputs are presented and compared to the cases of standard and extreme conditions with air pollution monitoring data as well as to simulations based on the WRF-ARW calculations.