

## Вычислительный комплекс «модель атмосферы – химическая транспортная модель» как модуль системы оценки качества воздуха

И.Н. Кузнецова<sup>1</sup>, Р.Б. Зарипов<sup>1</sup>, И.Б. Коновалов<sup>2</sup>, А.М. Звягинцев<sup>3</sup>,  
Е.Г. Семутникова<sup>4</sup>, А.А. Артамонова<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>ГУ «Гидрометцентр России», 123242, г. Москва, Б. Предтеченский пер., 11–13

<sup>2</sup>Институт прикладной физики РАН

603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

<sup>3</sup>Учреждение Российской академии наук Центральная аэрологическая обсерватория  
141700, г. Долгопрудный, Московская обл., ул. Первомайская, 3

<sup>4</sup>ГПУ Мосэкомониторинг, 119019, г. Москва, ул. Новый Арбат, 11, стр. 1

Поступила в редакцию 1.02.2010 г.

В разрабатываемой на примере Московского региона системе оценки качества воздуха предусматривается применение химической транспортной модели (ХТМ) CHIMERE, сопряженной с численной моделью атмосферы (МА). Обсуждаются численные эксперименты, цель которых – выбор оптимальных конфигураций ХТМ и МА, обеспечивающих приемлемую успешность расчетов концентраций газовых примесей и мелкодисперсного аэрозоля. Эксперименты проводились с использованием двух моделей: МА – MM5 и WRF ARW (Weather Research and Forecasting, ARW – Advanced Research WRF). Последняя включена в разрабатываемый для оперативных расчетов вычислительный модуль МА–ХТМ. Валидация модуля по данным рекомендованных Всемирной организацией здравоохранения маркеров качества воздуха ( $O_3$  и  $PM_{10}$ ) показала в целом удовлетворительные на настоящее время результаты, но вместе с тем выявила систематические погрешности модели, одной из главных причин которых предположительно является низкое качество данных об эмиссиях.

*Ключевые слова:* качество воздуха, мониторинг, прогноз, химическая транспортная модель, численная модель атмосферы, валидация численных моделей; air quality, monitoring, forecasting, chemical transport model, numerical atmospheric model, validation of numerical models.

### Введение

Основу системы оценки качества атмосферного воздуха составляет мониторинг содержания загрязняющих веществ в воздухе, включая прогнозирование с применением математических, статистических и стохастических моделей. Одним из приложений моделирования является расчет полей концентраций загрязняющих веществ с различными временными и пространственными масштабами [1, 2].

В большинстве развитых стран анализ и прогноз качества воздуха осуществляются с использованием вычислительных комплексов, состоящих из модели атмосферы (МА) и химической транспортной модели (ХТМ) [3, 4]. При таком подходе МА обеспечивает требуемой метеорологической информацией (как правило, высокого пространственного разрешения) ХТМ, которая, в свою очередь, рассчитывает поля концентраций загрязняющих ве-

ществ. Отечественные и зарубежные исследования показали перспективность данного подхода [5–7]. Вычислительные комплексы МА–ХТМ могут состоять из отдельных моделей (ETA–CMAQ [8], MM5/WRF–CHIMERE [9, 10] и др.) или представлять собой комплексную модель, включающую в себя модель динамики атмосферы и химический блок (GEM–AQ [11], WRF/Chem [12] и др.).

Сегодня наблюдается быстрый процесс международной интеграции в области прогнозирования качества воздуха. Так, объединение усилий нескольких стран в рамках Международного проекта CITEAIR (Common Information to European Air) позволило реализовать масштабную задачу оценки и прогнозирования качества воздуха для различных регионов Европы. В режиме реального времени можно получить информацию о содержании наиболее опасных воздушных загрязнителей (озона, диоксида азота и мелкодисперсного аэрозоля) и характеристики качества воздуха во многих европейских городах (сайт <http://www.airqualitynow.eu/>). На сайте <http://www.airnow.gov/index/> приводится индекс качества воздуха практически для любого населенного пункта США.

\* Ирина Николаевна Кузнецова (muza@mecom.ru); Радомир Булатович Зарипов (zaripov@mecom.ru); Игорь Борисович Коновалов (konov@appl.sci.nnov.ru); Анатолий Михайлович Звягинцев (azvyagintsev@cao-rhms.ru); Анна Александровна Артамонова.

В нашей стране для прогноза загрязнения воздуха пока еще широко используются статистические модели; развитие численного прогнозирования качества воздуха сдерживается по ряду причин. Тем не менее уже сегодня можно ставить задачу оценки качества воздуха с использованием современных средств наблюдений и прогнозирования. В настоящей статье на примере Московского региона представляется пилотная схема оценки качества воздуха с использованием вычислительного комплекса MA–XTM, основное внимание уделяется описанию используемых численных моделей и результатам их апробации.

## Модульная система оценки качества воздуха на примере Московского региона

В соответствии с рекомендациями Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), основополагающими элементами системы оценки качества воздуха являются наблюдения за содержанием загрязняющих веществ (ЗВ), численное моделирование для диагностики и прогнозирования ЗВ, представление результатов [13].

В настоящее время сложились благоприятные условия для создания современной системы оценки качества воздуха в Московском регионе.

*Во-первых*, здесь создана и развивается муниципальная автоматизированная сеть контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) Мосэкомониторинга, на которой осуществляются непрерывные наблюдения за концентрациями многих газовых примесей и мелкодисперсного аэрозоля (<http://www.mosecom.ru/>).

*Во-вторых*, благодаря сотрудничеству Института прикладной физики РАН (Нижний Новгород) и Межуниверситетской лаборатории атмосферных систем (Франция) стала возможной реализация химической транспортной модели CHIMERE ([www.lmd.polytechnique.fr/chimere](http://www.lmd.polytechnique.fr/chimere)) применительно к европейской территории России (ЕТР) [5, 14].

*Третьим* позитивным фактором является то, что в течение нескольких лет в Гидрометцентре России эксплуатируется численная модель атмосферы WRF ARW ([www.wrf-model.org](http://www.wrf-model.org)), демонстрирующая приемлемое качество прогнозов для территории ЕТР (<http://method.hydromet.ru/estimate/results/>). Объединение в модульный блок MA WRF ARW и XTM CHIMERE позволяет получить инструмент, пригодный не только для анализа, но и для прогноза концентраций отдельных примесей и качества воздуха. При интерпретации результатов (третий модуль системы) используются отечественные нормативы содержания загрязняющих веществ и рекомендации ВОЗ; на текущем этапе принимаются простейшие критерии – выполнение нормативов по отдельным загрязняющим веществам.

Таким образом, составляющими модулями разрабатываемой системы оценки качества воздуха для Московского региона являются:

1) мониторинг загрязняющих веществ в мегаполисе и ближних пригородах с использованием данных муниципальной автоматизированной сети контроля загрязнения атмосферы;

2) вычислительный комплекс MA–XTM (WRF ARW – CHIMERE);

3) интерпретация расчетов и подготовка информации о качестве воздуха в ориентированном на конкретного потребителя формате.

На сегодняшнем этапе исследований основные усилия авторов направлены на создание оптимальной конфигурации модуля MA–XTM. Ниже кратко описываются некоторые результаты адаптации и верификации моделей WRF ARW и CHIMERE.

## Организация совместного счета WRF ARW и CHIMERE. Результаты экспериментов с CHIMERE-2006

В первой версии реализованного модуля MA–XTM используется версия V2006 XTM CHIMERE, распространяемая с 2006 г. Модель CHIMERE развивается в Национальном центре научных исследований Франции, интернет-страница модели: [www.lmd.polytechnique.fr/chimere](http://www.lmd.polytechnique.fr/chimere). CHIMERE V2006 была опробована для территории Центрально-Европейского региона России в работе [5] (вместе с MA MM5). При расчетах на боковых границах области моделирования концентрации различных примесей задавались исходя из результатов климатического моделирования (модель MOZART2 [15]). В связи с этим при оценке качества воздуха требовалось удаление боковых границ от области интереса на 2–3 тыс. км [16].

Ввиду того что при описании поверхностных эмиссий и переносов в районах больших городов требуется достаточно высокое пространственное разрешение модели [17], для экономии вычислительных ресурсов используется метод вложенных сеток: внутри области моделирования выделяется область с более высоким разрешением, на границах которой используются концентрации, полученные при счете CHIMERE на грубой сетке.

Выбранная внешняя область CHIMERE имеет разрешение  $1 \times 1^\circ$  и покрывает территорию Европы и части Азии. Внутренняя область имеет размер  $81 \times 71$  точку сетки с разрешением  $0,250 \times 0,125^\circ$ , в область моделирования входят Москва и Нижний Новгород. Было проведено также несколько экспериментов с меньшей сеткой и с использованием более высокого пространственного разрешения. В расчетах CHIMERE задавались 12 вертикальных уровней в гибридных сигма-координатах, с верхним уровнем на высоте 200 гПа. Для получения начальных концентраций примесей при подготовке численного прогноза уровня загрязнения используется распространенный подход предварительного счета MA–XTM [6]. Проводился предварительный 3-суточный счет MA–XTM.

Используемая модель атмосферы WRF ARW (Weather Research and Forecasting, ARW – Advanced Research WRF) является одним из двух

вариантов мезомасштабной модели WRF. Данная модель развивается Национальным центром атмосферных исследований США (NCAR) с рядом научных организаций США. Используются версия 3.1, свободно распространяемая с апреля 2009 г., а также версия 3.1.1 (июль 2009 г.). С описанием динамической части модели и краткими характеристиками используемых параметризаций подсеточных процессов можно ознакомиться в [18], где также приводятся ссылки на более детальное описание отдельных блоков модели. При расчетах использовался набор параметризаций, ранее подобранный авторами по результатам численных прогнозов для ЕТР и Западной Сибири.

Источниками метеорологической информации при подготовке данных для счета модели служили: 1) последовательные глобальные анализы NCEP (National Center for Environmental Prediction) с горизонтальным разрешением  $1 \times 1^\circ$  и временной дискретностью 6 ч; 2) глобальные прогнозы NCEP с тем же пространственным и временным разрешением. В ряде экспериментов при счете WRF ARW встроена в модель технология FDDA (Four Dimensional Data Assimilation) — как обычная, так и со спектральным сглаживанием полей корректирующих добавок (в версии 3.1.1).

При подборе конфигурации использовались оценки метеорологических полей, выдаваемых WRF ARW, относительно синоптических наблюдений и данных радиозондирования. Также использовались данные измерений приземной концентрации озона на двух станциях, расположенных на территории МГУ им. М.В. Ломоносова (г. Москва,  $55,7^\circ$  с.ш.,  $37,53^\circ$  в.д.) и на территории Центральной аэрологической обсерватории (г. Долгопрудный,  $55,93^\circ$  с.ш.,  $37,5^\circ$  в.д.). При настройке системы оценивались максимальные суточные концентрации. Рассматривался период с 1 июля по 31 августа 2006 г.; в этот период в Москве несколько раз наблюдалось превышение норматива приземного озона.

В табл. 1 приводятся некоторые оценки качества восстановления комплексом МА–ХТМ концентрации приземного озона (результаты получены с использованием различных версий и конфигураций WRF ARW).

Была проведена серия прогностических расчетов приземной концентрации озона для лета 2009 г. В табл. 2 приводятся оценки прогноза WRF–CHIMERE на период до 72 ч (на 1, 2 и 3-и сут) в июле. Можно отметить, что, как и в другие месяцы, модельные прогнозы имеют преимущество перед инерционным прогнозом. Во-вторых, погрешности расчетов увеличиваются с ростом заблаговременности прогноза. Прогноз приземного озона для пригородной станции Долгопрудный имеет более высокие показатели успешности, чем для городской станции.

В контексте вопросов о погрешностях ХТМ рассматривались методические вопросы, в частности о выборе показателей качества воздуха. Норматив качества для озона установлен ВОЗ для усредненного за 8 ч значения и составляет  $100 \text{ мкг/м}^3$  [19]. Согласно действующим нормативным документам Минздрава РФ, стандартом качества для озона является осредненная за 20–30 мин максимальная разовая предельно допустимая концентрация ПДК<sub>м.р.</sub>, равная  $160 \text{ мкг/м}^3$ .

На основании данных измерений приземного озона в Москве летом 2009 г. установлено, что отечественный норматив содержания озона в приземном воздухе ни разу не был нарушен. Однако с учетом критерия усредненной за 8 ч концентрации нами выявлена иная ситуация: на расположенных в разных частях города станциях мониторинга количество дней, когда средняя 8-часовая концентрация  $\text{O}_3$  превысила  $100 \text{ мкг/м}^3$ , составило от 1 до 3, а в окрестностях г. Зеленограда таких дней за лето оказалось 5 (рис. 1).

Заметим, что более мягкий критерий ВОЗ для озона, по-видимому, вполне оправдан, если учесть, что серьезным недостатком атмосферных нормативов является факт отсутствия указания на возможность их специфического воздействия — канцерогенного, аллергенного и др. [20]. Кроме того, существует проблема несогласованности нормативов средних суточных концентраций, нацеленных на оценку токсического воздействия, и предельно допустимой максимальной разовой концентрации, отражающей эффекты рефлекторного воздействия [20, 21].

Таблица 1

Некоторые оценки точности расчета максимальных суточных концентраций приземного озона для периода 1.07–31.08.2006 г. для станций МГУ (числитель) и ЦАО (знаменатель)

Версия WRF	Горизонтальное разрешение WRF, км	Показатель ошибок		
		Смещение, $\text{мкг/м}^3$	СКО**, $\text{мкг/м}^3$	Коэффициент корреляции
3.1	$70 \times 70$	2,5/12,8	25,4/25,3	0,72/0,82
3.1	$20 \times 20$	8,2/16	26,9/26,2	0,74/0,84
3.1.1	$70 \times 70$	–2,3/7,8	25,2/23,9	0,72/0,81
3.1.1*	$70 \times 70$	–5,2/6,2	26,1/22,3	0,71/0,84
3.1.1*	$20 \times 20$	–3,2/6,2	25,4/21	0,69/0,88

\* Используется параметризация пограничного слоя университета Yonsei вместо параметризации Меллора–Ямады–Янича.

\*\* Среднеквадратическая ошибка расчета.

Таблица 2

Оценки точности рассчитанных от срока 00 ч Всемирного согласованного времени 1–28 июля 2009 г. прогнозов максимальной суточной концентрации приземного озона по наблюдениям на станциях МГУ (числитель) и ЦАО (знаменатель)

Версия WRF	Горизонтальное разрешение WRF, км	Заблаговременность, сут	Смещение, мкг/м <sup>3</sup>	СКО, мкг/м <sup>3</sup>	Коэффициент корреляции
3.1**	70×70	1	8,7/0,3	19,1/14,9	0,68/0,77
		2	13,7/2,4	25,9/16,8	0,59/0,72
		3	13,2/2,2	28,7/21,1	0,45/0,56
3.1	20×20	1	5/−1,2	15,8/15,7	0,75/0,74
		2	11,9/2,0	25,3/17,8	0,53/0,68
		3	9,3/0,6	21,9/20,5	0,56/0,52
3.1**	20×20	1	6,6/1,4	16,1/15,0	0,76/0,76
		2	13,0/4,9	23,6/16,2	0,63/0,77
		3	13,6/4,5	30,4/21,5	0,52/0,54
3.1.1	20×20	1	4,7/−1,3	16,1/15,6	0,74/0,74
		2	11,6/1,9	24,4/17,3	0,56/0,70
		3	9,5/0,6	21,2/20,0	0,6/0,55
3.1.1*	20×20	1	5,1/−3,7	17,7/15,0	0,73/0,77
		2	11,9/−0,1	22,0/13,8	0,68/0,82
		3	8,2/−2,2	19,4/18,8	0,68/0,63
3.1.1	10×10	1	5,5/−4,5	19,4/15,0	0,70/0,78
		2	12,5/0,6	23,2/14,5	0,675/0,81
		3	10,2/−1,4	19,4/15,7	0,71/0,77
3.1.1*	10×10	1	2,4/−6,4	18,1/15,9	0,71/0,78
		2	10,3/−1,4	21,1/14,0	0,69/0,83
		3	9,3/−2,1	18,3/17,1	0,75/0,68
Инерционный прогноз	—	1	−0,8/−1,2	28,1/20,9	0,26/0,62
		2	0,8/−0,1	26,7/25,9	0,36/0,43
		3	0,4/−0,5	29,9/29,9	0,19/0,14

\* Используется параметризация пограничного слоя университета Yonsei вместо параметризации Меллора–Ямады–Янича.

\*\* Используется технология FDDA при счете прогнозов.

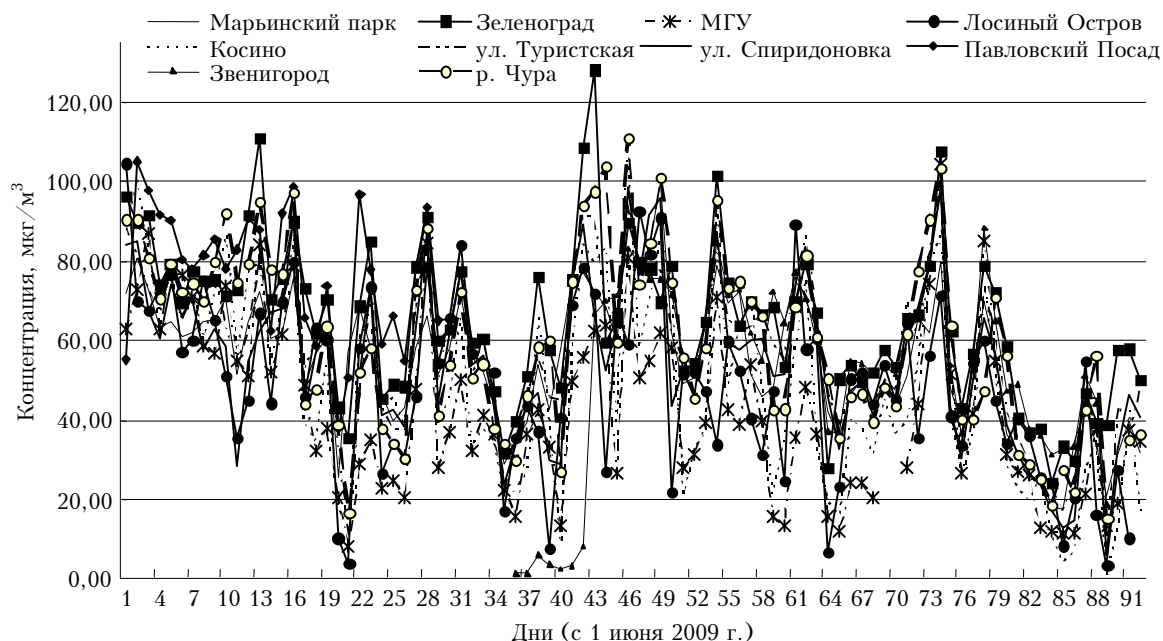


Рис. 1. Максимальная за сутки усредненная 8-часовая концентрация озона, измеренная на АСКЗА «Мосэкомониторинг» 1 июня – 30 августа 2009 г.

При том что вопрос о выборе норматива для озона при оценке качества воздуха остается открытым, важно знать, в какой степени создаваемый вычислительный модуль WRF ARW—CHIMERE способен прогнозировать наиболее опасные озоновые эпизоды, какова точность расчетов сопряженных моделей именно в диапазоне величин превышений нормативов качества и приближения к критическим уровням. Такие сведения о погрешностях модельных блоков и результирующих ошибках необходимы при интерпретации численных расчетов на этапе непосредственной оценки качества воздуха.

В результате проведенных численных экспериментов было установлено следующее.

1. Для описания динамики приземного озона в районе г. Москвы требуется использовать CHIMERE с достаточно высоким пространственным разрешением (порядка 10 км), но дальнейшее увеличение разрешения не улучшает результатов расчета. Данный вывод согласуется с результатами исследований [17, 22].

2. Для обеспечения метеорологической информацией CHIMERE на грубой сетке целесообразно использовать разрешение WRF ARW 70 км; более высокое разрешение MA не улучшает результаты.

3. Для анализа и прогноза концентрации приземного озона непосредственно в г. Москве достаточно использовать внутреннюю область CHIMERE размером примерно 300 x 300 км. Этот вывод согласуется с приводимыми в работе [5] результатами расчета и связан, по-видимому, с большими антропогенными эмиссиями химических предшественников озона в районе Москвы.

4. При прогнозе концентраций приземного озона лучшие результаты достигались в том случае, если при счете по модели CHIMERE на внутренней сетке использовались результаты счета WRF ARW с высоким пространственным разрешением (10–20 км). При анализе (счет WRF ARW с использованием FDDA) такого эффекта не наблюдалось.

5. Результаты расчетов CHIMERE по модели WRF 3.1 и WRF 3.1.1 существенно различаются при сходной конфигурации обеих версий модели. При этом различия наблюдаются и при одинаковой конфигурации моделей — только за счет разности в параметризациях подсчетных процессов.

Сопоставляя полученные данные с опубликованными результатами прогноза приземного озона, в том числе подготовленными с использованием CHIMERE ([7, 23]), авторы вынуждены признать, что текущая версия системы требует доработки. Так, для территории Франции коэффициент корреляции для прогноза максимальной суточной концентрации озона на 1-е–3-и сут в городах и вблизи них колеблется от 0,85 до 0,79.

## Результаты численных экспериментов с CHIMERE V200709

Использовавшаяся в первой серии численных экспериментов с MA—XTM версия модели CHIMERE (V2006) нуждается в замене на более современную, самым существенным отличием которой от преды-

дущих является кардинальное улучшение блока динамики аэрозольных частиц, а также возможности многопроцессорного счета. В настоящее время выполняются работы по интегрированию в вычислительный комплекс новой версии CHIMERE — V200709. Численные эксперименты ведутся в двух направлениях. Проводится адаптация блока MA—XTM для Московского региона при использовании прогностических данных модели атмосферы WRF ARW.

В фокусе других экспериментов — выбор конфигурации модели CHIMERE для оптимизации расчетов концентраций мелкодисперсного аэрозоля и газовых примесей. Отметим, что тестирование в этих целях проводится с использованием метеорологических данных модели MM5-V3. Именно в такой постановке задачи были получены результаты первых численных расчетов по модели CHIMERE для Европейского региона, описанные в работе [14].

Серия численных экспериментов MM5 — CHIMERE была направлена на изучение чувствительности CHIMERE к описанию эмиссий, а также к способам задания «вложенной» сетки высокого разрешения. В экспериментах рассматривались а) два разных способа перерасчета данных ЕМЕР (European Monitoring and Evaluation Programme) на модельную сетку более высокого разрешения, б) различные версии исходных данных.

Результаты проведенных экспериментов с CHIMERE V200709 показали, что эта версия демонстрирует в целом приемлемое качество расчета концентрации приземного озона и  $PM_{10}$ . Имеются подтверждения, что эмиссии, полученные путем перераспределения данных ЕМЕР пропорционально плотности населения, обеспечивают лучшие результаты по сравнению со стандартной процедурой, предусмотренной в CHIMERE на основе данных по землепользованию.

Ниже детально рассматриваются результаты части проведенных численных экспериментов с CHIMERE V200709.

## Результаты модельных расчетов концентрации $PM_{10}$

Анализ возможностей CHIMERE описывать пространственно-временную изменчивость массовой концентрации  $PM_{10}$  проводился по данным АСКЗА в теплый период 2007 г., когда атмосферные условия менялись в широком диапазоне, а также имели место длительные зарегистрированные эпизоды адвекции продуктов горения лесных пожаров (август). Для верификации XTM использовались наблюдения на городских станциях и удаленной на 40 км от мегаполиса ст. Зеленоград. Анализ данных мониторинга указывает на то, что поле концентраций  $PM_{10}$  в регионе имеет высокую неоднородность. Это свидетельствует о значимом вкладе локальных источников в его формирование. Например (табл. 3), летом 2007 г. количество дней со средней за сутки концентрацией  $PM_{10} > 50$  мкг/м<sup>3</sup> на станции в подветренном секторе городского

Характеристики модельных расчетов среднесуточных концентраций  $PM_{10}$ . Лето 2007 г.

Характеристика	$PM_{10}$ , $\mu\text{кг}/\text{м}^3$					Число дней с $PM_{10} > 50 \mu\text{кг}/\text{м}^3$				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Станция										
Средняя концентрация, $\mu\text{кг}/\text{м}^3$	42	38	31	36	24	23	17	11	16	8
(1)	17	19	20	18	13	0	0	0	0	0
(2)	33	35	38	34	25	4	9	17	10	6
$\Delta PM_{10}$	-9	-2	7	-2	1	-	-	-	-	-
СКО, $\mu\text{кг}/\text{м}^3$	19	13	12	10	8	-	-	-	-	-
$R$	0,74	0,78	0,80	0,82	0,84	-	-	-	-	-

Примечания: 1) станция 1 – Косино, 2 – Марьинский парк, 3 – МГУ, 4 – Останкино, 5 – Зеленоград; 2) (1) – расчет до коррекции, (2) – с коррекцией систематической ошибки; 3)  $\Delta PM_{10}$  – средняя ошибка; 4)  $R$  – коэффициент корреляции «расчет–измерения».

шлейфа почти в 2 раза больше, чем в парковой зоне западного (наветренного) сектора (МГУ) и почти в 3 раза больше, чем на загородной станции, редко оказывающейся под влиянием выноса из мегаполиса. (В соответствии с нормативами качества воздуха ВОЗ предельно допустимая среднесуточная массовая концентрация (ПДК<sub>с.с.</sub>) для  $PM_{10}$  составляет  $50 \mu\text{кг}/\text{м}^3$  [21].)

Получено, что радиус корреляции между отдельными станциями возрастает по мере увеличения интервала осреднения. Так, если коэффициент корреляции  $PM_{10}$  в среднем за лето 2007 г. между станциями оказался около 0,8, то в летние месяцы между станциями он изменялся в диапазоне 0,3–0,9. Наиболее тесные связи концентраций  $PM_{10}$  наблюдаются между загородной станцией (Зеленоград) и самой западной городской станцией (МГУ).

По результатам тестирования установлено, что CHIMERE систематически занижает концентрации  $PM_{10}$ . Можно отметить, что это совпадает с выводами, полученными, например, при тестировании аэрозольного блока модели EMEP [24]. С учетом выявленных достаточно тесных корреляционных связей между модельными и измеренными концентрациями  $PM_{10}$  (см. табл. 3) была проведена общая линейная коррекция расчетов. Для большинства станций она оказалась вполне результативной; несмотря на некоторое увеличение, дисперсия рассчитанных с коррекцией концентраций  $PM_{10}$  осталась меньше наблюдаемой на станциях изменчивости. Наибольшие погрешности расчетов получены для самой «загрязненной» станции на востоке города, что, по-видимому, является следствием, по крайней мере, двух причин: влияния неучтенных местных источников и вклада выносимого из мегаполиса аэрозоля на преимущественно подветренную территорию.

Можно заметить, что общая коррекция расчетов на систематическое начальное занижение менее удачной оказалась для станции МГУ, где начальное занижение концентраций  $PM_{10}$  сменилось на небольшое завышение, что привело также к завыше-

нию количества дней со среднесуточной концентрацией  $PM_{10} > 50 \mu\text{кг}/\text{м}^3$  (см. табл. 3). Самые лучшие результаты после коррекции получены для загородной станции Зеленоград, что указывает на проблемы с описанием городских эмиссий.

На рис. 2 приводятся рассчитанные и измеренные концентрации  $PM_{10}$  для городской и загородной станций; они иллюстрируют, что модельные расчеты вполне удовлетворительно описывают временную и пространственную изменчивость концентраций не только в периоды низких уровней  $PM_{10}$ , но и в эпизодах значительного увеличения его содержания (за исключением первых чисел июля). Видно, что CHIMERE, сопряженная с метеорологической моделью (в данных расчетах – с MM5), вполне адекватно отражает процессы накопления аэрозоля в воздухе при затишье и очищение воздуха от примесей при смене воздушных масс и прохождении атмосферных фронтов. (В нижней части рис. 2 показаны температура и скорость ветра на изобарической поверхности 925 гПа, стрелками отмечено прохождение атмосферных фронтов; штриховкой – периоды переноса воздуха из районов лесных пожаров).

Следует отметить, что согласно отдельно проведенному анализу выделяющийся повышенным уровнем  $PM_{10}$  продолжительный период в августе (средние суточные концентрации  $PM_{10}$  превышают  $70 \mu\text{кг}/\text{м}^3$ ) в значительной мере был обусловлен поступлением загрязненной продуктами горения лесных пожаров воздушной массы. Эпизод прерывался и закончился прохождением атмосферных фронтов с дождями, что вполне адекватно отражено в модельных расчетах. Эффекты лесных пожаров не были учтены в модельных расчетах, однако работа по их учету в CHIMERE на основе спутниковых измерений лесных пожаров приборами MODIS и SEVERI целенаправленно ведется. Заметим, что в настоящее время в мире не существует единой методики моделирования эффектов лесных пожаров и это направление является сферой активных научных исследований.

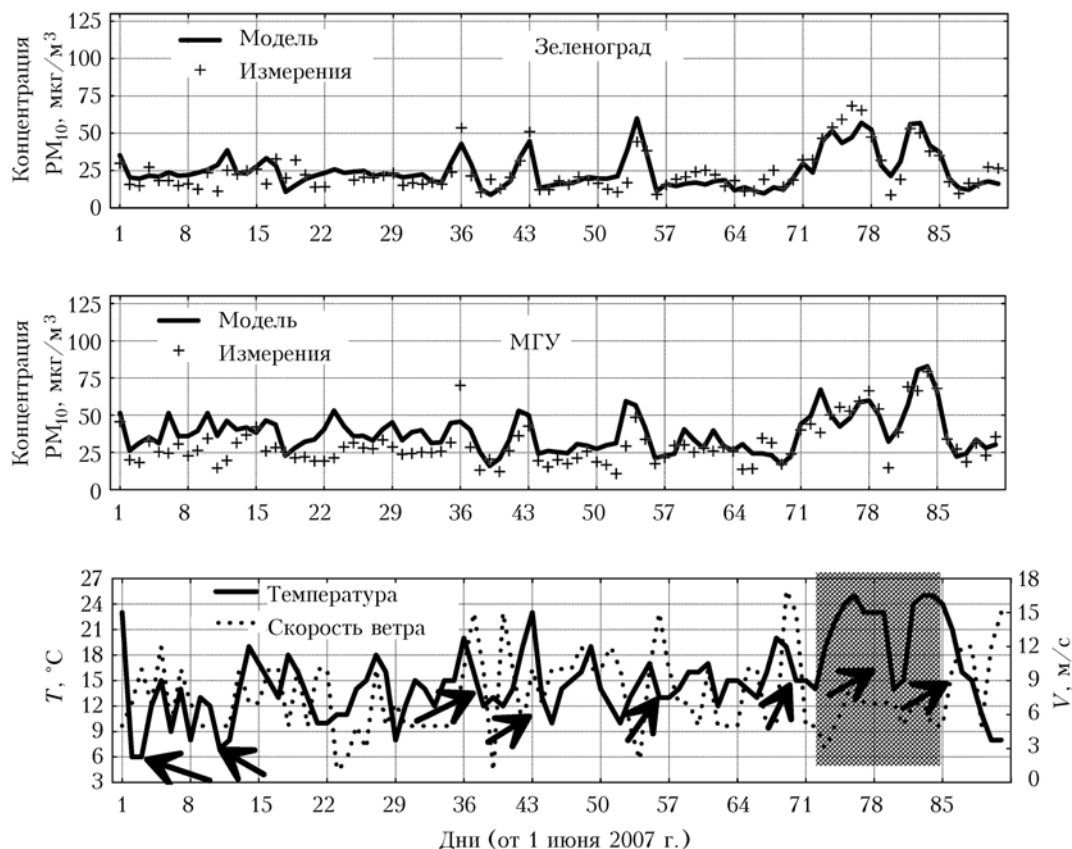


Рис. 2. Средняя суточная концентрация  $PM_{10}$ , рассчитанная по модели CHIMERE и измеренная на станциях АСКЗА 1 июня – 30 августа 2009 г.

### Заключение

В рамках инициативных исследований при поддержке РФФИ сформулирована архитектура пилотной системы анализа и прогноза качества воздуха в Московском регионе. Создан действующий в реальном времени вычислительный модуль МА-ХТМ: расчет концентраций отдельных загрязнений по модели CHIMERE, которая обеспечивается метеорологическими данными модели атмосферы WRF ARW. Многостороннее тестирование обеспечило выбор оптимальных на сегодня конфигураций модели WRF ARW и CHIMERE.

Верификация химической транспортной модели CHIMERE по данным основных маркеров качества воздуха – приземного озона (версии V2006 и V200709) и  $PM_{10}$  (V200709) на станциях Московского мегаполиса показала приемлемые для данного этапа исследований результаты, а также позволила выявить систематические погрешности моделей, знание которых необходимо для интерпретации результатов численных расчетов.

Показано, что одной из главных причин систематического занижения концентраций  $PM_{10}$  является низкое качество данных об эмиссиях. Ставится вопрос о целесообразности усвоения химической транспортной моделью данных спутникового мониторинга за очагами природных пожаров, имеющих значительные масштабы в России в периоды за-

сушливой погоды весной (сухопалы) и летом (горение лесов и торфяников).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 08-05-1345 офи-ц, 08-05-00969-а), а также Программы фундаментальных исследований ОФА РАН «Физика атмосферы: электрические процессы, радиофизические методы исследований».

1. Алоян А.Е. Моделирование динамики и кинетики газовых примесей и аэрозолей в атмосфере. М.: Наука, 2008. 415 с.
2. Генихович Е.Л., Филатова Е.Н. Объединенная модель атмосферной диффузии от совокупности источников // Проблемы физики пограничного слоя атмосферы и загрязнения воздуха / Под ред. С.С. Чичерина. СПб.: Гидрометеоздат, 2002. С. 58–75.
3. Vautard R., Builtjes P.H.J., Thunis P., Cuvelier C., Bedogni M., Bessagnet B., Honoré C., Moussiopoulos N., Pirovano G., Schaap M., Stern R., Tarrason L., Wind P. Evaluation and intercomparison of Ozone and  $PM_{10}$  simulations by several chemistry transport models over four European cities within the City-Delta project // Atmos. Environ. 2007. N 41. P. 173–188.
4. Stern R., Builtjes P., Schaap M., Timmermans R., Vautard R., Hodzic A., Memmesheimer M., Feldmann H., Renner E., Wolke R., Kerschbaumer A. A model inter-comparison study focusing on episodes with elevated  $PM_{10}$  concentrations // Atmos. Environ. 2008. V. 42. P. 4567–4588.

5. Коновалов И.Б., Еланский Н.Ф., Звягинцев А.М., Беликов И.Б., Бикманн М. Валидация химически-транспортной модели нижней атмосферы Центрально-Европейского региона России с использованием данных наземных и спутниковых измерений // Метеорол. и гидрол. 2009. № 4. С. 65–74.
6. McHenry J.N., Ryan W.F., Seaman N.L., Coats C.J., Pudykiewicz J., Jr., Arunachalan S., Vukovich J.M. A real-time Eulerian photochemical model forecast system: Overview and initial ozone forecast performance in the northeast U.S. corridor // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2004. V. 85. P. 525–548.
7. Rouil L., Honore C., Vautard R., Beekmann M., Bessagnet B., Meleux F., Dufour A., Elichegaray C., Flaud J.-M., Menut L., Martin D., Peuch A., Peuch V.-H., Poisson N. PREV'AIR: an operational forecasting and mapping system for air quality in Europe // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2009. V. 90. P. 73–83.
8. Otte T.L., Pouliot G., Pleim J.E., Young J.O., Schere K.L., Wong D.C., Lee Pius C., Tsidulko M., McQueen J.T., Davidson P., Mathur R., Chuang H.Y., DiMego G., Seaman N.L. NCEP notes: Linking the EPA model with the Community Multiscale // Air Quality forecasting system. Weather and Forecasting. 2005. V. 20. P. 367–384.
9. Meij A., Gzella A., Thunis P., Cuvelier C., Bessagnet B., Vinuesa J.F., Menut L. The impact of MM5 and WRF meteorology over complex terrain on CHIMERE model calculations // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2009. V. 9. P. 2319–2380.
10. Vivanco M.G., Palomino I., Martin F., Palacios M., Jorba O., Jimenez P., Baldasano J.M., Azula O. An evaluation of the performance of the CHIMERE model over Spain using meteorology from MM5 and WRF models // Computation Science and Its Application. ICCSA. 2009. Berlin: Springer, 2009. P. 107–117.
11. Neary L., Kaminski Jacek W., Lupu A., McConnell J.C. Developments and results from a Global Multiscale Air Quality Model (GEM-AQ) // Air Pollution modeling and its application. 2007. V. XVII. P. 403–410.
12. Grell G.A., Pecjham S.E., Schmitz R., McKeen S.A., Frost G., Skamarock W.C., Eder B. Fully coupled online chemistry model within the WRF model // Atmos. Environ. 2005. V. 39. P. 6957–6975.
13. Мониторинг качества атмосферного воздуха для оценки воздействия на здоровье человека // Региональные публикации ВОЗ. Европейское региональное бюро. Копенгаген. Европейская серия, № 85. (URL: <http://www.euro.who.int/air/publications/>).
14. Konovalov I.B., Beekmann M., Vautard R., Burrows J.P., Richter A., Nijß H., Elansky N. Comparison and evaluation of modelled and GOME measurement derived tropospheric NO<sub>2</sub> columns over Western and Eastern Europe // Atmos. Chem. Phys. 2005. V. 5. P. 169–190.
15. Horowitz L.W., Walters S., Mauzerall D.L., Emmons L.K., Rasch P.J., Granier C., Tie X., Lamarque J.-F., Schultz M.G., Tyndall G.S., Orlando J.J., Brasseur G.P. A global simulation of tropospheric ozone and related tracers: Description and evaluation of MOZART, version 2 // J. Geophys. Res. D. V. 108. N 24. 4784, doi:10.1029/2002JD002853, 24 December 2003.
16. Lee P., Kang D., McQueen J., Tsidulko M., Hart M., DiMego G., Seaman N., Davidson P. Impact of domain size on modelled ozone forecast for the Northeastern United States // J. Appl. Meteorol. and Clim. 2008. V. 47. P. 443–461.
17. Myrto V., Menut L. Does an Increase in air quality models' resolution bring surface ozone concentrations closer to reality? // J. Atmos. and Oc. Technol. 2008. V. 25. P. 1955–1968.
18. Scamarock 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 Advances Research WRF Version 3. 2008. NCAR Technical Note. 113 p.
19. Рекомендации ВОЗ по качеству воздуха, касающиеся твердых частиц, озона, двуокиси азота и двуокиси серы. Глобальные обновленные данные. 2005 год. Женева: Всемирная организация здравоохранения, 2006. (URL: <http://www.euro.who.int/air/publications/>).
20. Кротов Ю.А. К установлению гигиенических критериев качества атмосферного воздуха и его влияния на другие природные среды // Проблемы физики пограничного слоя атмосферы и загрязнения воздуха / Под ред. С.С. Чичерина. СПб.: Гидрометеоздат, 2002. С. 303–309.
21. Демин В.И., Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н. О действующих в Российской Федерации нормативах по содержанию озона в атмосферном воздухе // Экология человека. 2009. № 1. С. 4–8.
22. Van Loon M., Vautard R., Schaap M., Bergstrom R., Bessagnet B., Brandt J., Builtjes P.J.H., Christensen J.H., Cuvelier C., Graff A., Jonson J.E., Kroli M., Langner J., Roberts P., Rouil L., Stern R., Tarrason L., Thunis P., Vignati E., White L., Wind P. Evaluation of long-term ozone simulations from seven regional air quality models and their ensemble // Atmos. Environ. 2007. V. 41. P. 2083–2097.
23. Honoré C., Rouil L., Vautard R. Predictability of European air quality: Assessment of 3 years of operational forecasts and analyses by the PREV'AIR system // J. Geophys. Res. D. 2008. V. 113. 04301, doi:10.1029/2007JD008761.
24. Цыро С.Г. Региональная модель формирования, трансформации и дальнего переноса атмосферного аэрозоля: Описание модели // Метеорол. и гидрол. 2008. № 2. С. 34–46.

*I.N. Kuznetsova, R.B. Zaripov, I.B. Konovalov, A.M. Zvyagintsev, E.G. Semutnikova, A.A. Artamonova. The computational complex including a mezoscale atmospheric model and a chemistry transport model as a module of the air quality assessment system.*

The air quality assessment system, which is now under development in Moscow region is designed to include the CHIMERE chemistry transport model (CTM) and the WRF (or MM5) mesoscale atmospheric model. CHIMERE enables simulations of air pollutant concentration fields, while the atmospheric model (AM) provides it with the necessary meteorological information. This article discusses numerical experiments performed in order to specify the optimal choice of the CTM and AM configurations and to insure satisfactory quality of the calculations of concentrations of gaseous species and aerosols. The experiments have been performed with both MM5 and WRF ARW; the latter is included in the computational module "AM-CTM", which can be used for the analysis and forecasting of the air quality. The experiments involved indicators recommended by WHO (O<sub>3</sub> and PM<sub>10</sub>) and have yielded, in general, satisfactory agreement of simulations with air quality monitoring data, although they also revealed systematic biases in the simulated concentrations, which are likely caused by inaccuracies in the input emission data.