МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Пономарёв Николай Андреевич

Численное моделирование воздействия Московского мегаполиса на состав региональной атмосферы

Специальность:
25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре физики атмосферы физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

Научный руководитель – **Николай Филиппович Еланский** - доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН

Научный руководитель – **Виктор Иванович Захаров** - кандидат физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты

– **Ларин Игорь Константинович** – доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе Федерального исследовательского центра им. Н.Н. Семенова РАН», лаборатория химической физики атмосферы, заведующий лабораторией

– **Лукьянов Александр Николаевич –** кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральная Аэрологическая Обсерватория», Росгидромет, отдел физики высоких слоёв атмосферы, лаборатория численных исследований атмосферных процессов, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией

-**Минашкин Вячеслав Михайлович –** доктор технических наук, профессор по кафедре физики, Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт «Центр», отдел исследований и разработок по ведению автоматизированных баз данных, старший научный сотрудник

Защита диссертации состоится «16» декабря 2021 г. в 17:00 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.15 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, д. 1, стр. 2, Физический факультет.

E-mail: versan@physics.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: https://istina.msu.ru/dissertations/403554318/

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, кандидат физико-математических наук,
С.В. Колесов



Введение. Многообразие и сложность физико-химических процессов, протекающих в широком диапазоне пространственных и временных масштабов, бросают серьезный вызов исследователям приземного слоя атмосферы. Рост в мире городского населения, увеличение занимаемой городами территории приводят к тому, что антропогенные факторы играют все более важную роль в изучении изменений состава атмосферы и состояния климатической системы. Проведенные в Мехико и Париже международные комплексные атмосферные исследования показали, что на основе полученных научных результатов можно разработать действенные меры по снижению антропогенного прессинга на городскую среду и повысить качество воздуха [1-3]. Эти меры должны предусматривать не только общее снижение антропогенных выбросов, но и изменение их состава, оказывая тем самым влияние на окислительные свойства городского воздуха и ускоряя удаление токсичных соединений из атмосферы. Основой для принятия решений в каждом конкретном случае являются результаты мониторинга и численного химико-транспортного моделирования состояния атмосферы, эффективность которого зависит от точности задания эмиссий примесей, определяющих в первую очередь состояние фотохимической системы в данном городе.

Из-за многообразия источников и условий, в которых они действуют, и необходимости использования многочисленных предположений результаты расчетов эмиссий, полученные разными группами экспертов, сильно различаются [4-6]. В этой связи основой для изучения процессов, определяющих в Москве состав атмосферы, являются данные многолетних наблюдений на сети станций контроля загрязнения атмосферы Государственного природоохранного бюджетного учреждения «Мосэкомониторинг» (МЭМ) [https://mosecom.mos.ru/]. Именно использование большого массива наблюдений совместно с проведением серий численных экспериментов на современной химико-транспортной моделью SILAM (http://silam.fmi.fi/) в данной работе позволило не только изучить ключевые особенности пространственно-временной изменчивости загрязнения городской атмосферы, но и уточнить оценки московских эмиссий, детально проанализировать химический режим озона и установить влияние Московского мегаполиса на региональный состав атмосферы.

Актуальность работы связана с необходимостью развития современных методов анализа данных, получаемых, как при проведении регулярных наблюдений о содержании ключевых газовых составляющих атмосферы, так и при проведении расчетов с помощью химико-транспортных моделей. Существенное влияние на состояние атмосферы оказывают фотохимические и химические процессы, происходящие с активным участием атмосферных микрочастиц аэрозолей и малых газовых примесей. На сегодняшний день химико-транспортные модели составляют основу мировой практики изучения и прогноза состава

атмосферы. Однако, для работы любых численных моделей необходимо задание начальных и граничных условий, в качестве которых берутся начальные поля концентраций газовых примесей и аэрозолей и их эмиссии в атмосферу от различных источников. Одной из наиболее важных проблем, не имеющих окончательного решения, является оценка величин эмиссий загрязняющих примесей атмосферы. Особенно остро эта проблема стоит для наиболее густо населенных территорий – мегаполисов и крупных городов, где сосредоточено большое количество антропогенных источников. Как показывает практика, инвентаризации источников, выполненных разными группами исследователей, приводят к сильно различающимся результатам – на десятки, а в некоторых случаях и сотни процентов. Решение проблем о задании величин эмиссий загрязняющих веществ на основе данных измерений, их использования для повышения точности численных расчетов, выявления природы ошибок и адаптации модели к городским условиям послужили главной мотивацией к написанию данной работы.

Целью данной работы является исследование пространственно-временной изменчивости газового и аэрозольного загрязнения приземного слоя атмосферы (ПСА) Московского мегаполиса и его влияния на состав региональной атмосферы на основе совместного анализа данных многолетних наблюдений концентрации ключевых малых газовых и аэрозольных составляющих ПСА и результатов численных расчетов с использованием региональной химико-транспортной модели SILAM.

Для осуществления цели данной работы были поставлены следующие **задачи**:

1. Исследование особенностей изменчивости состава атмосферы, используя данные многолетних наблюдений за период 1 января 2005 - 31 декабря 2017 гг. о содержании газовых примесей и аэрозолей на около 50-ти наблюдательных станциях, входящих в систему «Мосэкомониторинг» (https://mosecom.mos.ru/). Определение пространственных и временных характеристик содержания ключевых загрязняющих примесей в атмосфере Москвы: CO, NO_x, SO_2, NMHC (неметановые углеводороды), PM_{10} (аэрозольные частицы размером менее 10 μm).

2. Оценка значений среднегодовых эмиссий загрязняющих примесей со всей территории Москвы на основе данных концентрационных наблюдений.

3. Определение характеристик недельного цикла загрязняющих примесей и изучение его связи с химическим режимом озона в Москве и Московском регионе.

4. Восстановление пространственной структуры городских источников атмосферного загрязнения Москвы, а также их временной изменчивости на основе проведения серии

численных экспериментов с помощью химико-транспортной модели (ХТМ) SILAM (http://silam.fmi.fi/).

5. Исследование особенностей изменчивости состава и качества воздуха в приземном слое атмосферы Москвы в разные сезоны и при разных метеорологических условиях с помощью ХТМ SILAM.

6. Восстановление вертикальной структуры загрязнения приземного слоя атмосферы в Москве и Московском регионе, используя данные расчетов ХТМ SILAM и наблюдений.

7. Проведение анализа неопределенности расчетов химико-транспортной модели SILAM и их коррекция в ходе процедуры постобработки, с целью повышения точности диагностических и прогностических возможностей модели.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Достаточно плотная сеть автомагистралей, покрывающая всю территорию Московского мегаполиса, формирует пространственное распределение концентраций CO, NO, NO_2 близкое к однородному.
2. Содержание примесей антропогенного происхождения в Москве в период 2005-2017гг., определяющих качество приземного воздуха, демонстрирует значимые отрицательные тренды.
3. Рассчитанные по данным наблюдений среднегодовые значения эмиссий для примесей CO, NO_x согласуются с данными европейских инвентаризаций EDGAR v 4.2 (https://eccad3.sedoo.fr/) и TNO (https://www.tno.nl/en/). Однако, эмиссии CH_4 и SO_2, полученные в данной работе, существенно меньше, чем приведенные в инвентаризациях.
4. Амплитуды недельного цикла концентраций загрязняющих примесей в Москве, которые определяются как разница между средними будними и воскресными концентрациями для дневных значений (08: 00–22: 00), усредненные за весь период измерений на 49 станциях, составляют 23.9, 16.7, 13.6, 6.3, 7.6 и 14.5 % для NO, NO_2, CO, NMHC, SO_2 и PM_{10}, соответственно. Для Москвы характерен режим озона, более чувствительный к содержанию летучих органических соединений (ЛОС), чем к NOx, Образование экстремально высоких концентраций озона с высокой степенью вероятности связано с ростом ЛОС в атмосфере Москвы.

5. Использование эмиссий, полученных на основе наблюдений, а не рассчитанных на основе статистических данных, повышает эффективность использования XTM SILAM для оценки качества воздуха в Москве и Московском регионе.

6. Расхождения между моделью и наблюдениями могут быть существенными в случае штилевых условий, характерных для ситуаций присутствия над городом блокирующего антициклона, как в теплый, так и в холодный сезоны года. Предложенная в данной работе процедура коррекции расчетов полей концентраций загрязняющих примесей в ходе постобработки, позволяет значительно повысить точность прогнозов состава и качества воздуха модельных расчетов.

Научная новизна работы состоит в том, что**:**

1. Получены ключевые характеристики пространственной и временной картины изменчивости состава и качества воздуха в приземном слое атмосферы Москвы и на прилегающих к ней территориях. Высокая степень достоверности результатов обеспечивается использованием уникального набора данных долговременных измерений сети станций наблюдения «Мосэкомониторинг» о содержании основных загрязняющих примесей атмосферы: CO, NO, NO_2, NMHC, SO_2, PM_{10} за продолжительный период наблюдений: с 1 января 2005 по 31 декабря 2017 гг.

2. С применением нового метода по данным концентрационных наблюдений была проведена оценка величины одного из главных входных параметров – матрицы эмиссий загрязняющих примесей, необходимых для работы современных численных моделей атмосферы. Эти оценки эмиссий были в дальнейшем использованы и уточнены в ходе проведения численных экспериментов с использованием химико-транспортной модели SILAM.

3. Создана система автоматических прогнозов с помощью модели SILAM для получения оперативной информации о полях загрязняющих примесей в Московском регионе. В настоящее время в качестве метеопараметров используются данные оперативных прогнозов модели ICON (https://opendata.dwd.de/weather/nwp/icon-eu/grib/00/), а также данные расчетов SILAM для Европы и Европейской части России (http://silam.fmi.fi/thredds/catalog/silam_europe_v5_7/runs/cata log.html), в качестве начальных и граничных условий.

4. Предложена новая процедура коррекции расчетов в ходе постобработки, основанная на использовании фильтра Калмана и статистических данных о внутрисуточной изменчивости величины неопределенности моделируемых концентраций загрязняющих примесей, позволившая повысить эффективность использования модели SILAM для диагностики и прогнозирования состава и качества воздуха в Московском мегаполисе и на прилегающих к нему территориях.

Научная значимость заключается в том, что при совместном использовании данных многолетних наблюдений на сети московских станций мониторинга и численных расчетов с применением химико-транспортной модели были изучены характерные особенности пространственно-временной изменчивости состава и качества воздуха в Московском мегаполисе. Представленные оценки рассчитаны на основе современных методов и могут быть использованы не только для задач, связанных с контролем и прогнозом качества воздуха на урбанизированных территориях, но и для решения фундаментальных задач в области физики и химии атмосферы, и для принятия управленческих решений по снижению риска антропогенных воздействий на состояние окружающей среды и региональный климат.

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается сочетанием данных наблюдений и расчетов химико-транспортной модели SILAM. Полученные оценки были сопоставлены с результатами, описанными в публикациях других научных групп, специализирующихся по тематике данной работы. Отдельное внимание было уделено изучению неопределенности модельных расчетов и построению динамико-статистической модели ошибок, позволяющей корректировать модельные поля концентрации загрязняющих примесей в ходе постобработки данных.

Апробация работы. Результаты данной работы были доложены на многочисленных международных и всероссийских конференциях. Основные результаты опубликованы в 11 статьях и 2 переводах в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus и Russian Scientific Citation Index.

Личный вклад автора. Все основные результаты работы были получены полностью или при непосредственном участии автора. Некоторые частные результаты по обработке данных наблюдений были получены совместно с Н.Ф. Еланским, Я.М. Веревкиным и А.В. Шилкиным, часть результатов моделирования была получена при сотрудничестве с Р.Д. Кузнецовым и А.А. Кирсановым.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Диссертационная работа изложена на 145 страницах, из них

133 страниц текста, включая 37 рисунков и 16 таблиц. Список литературы содержит 109 наименований и представлен на 12 страницах.

Содержание диссертации.

Во **введении** работы кратко изложены мотивация и актуальность работы, приведены цели и задачи исследования, а также сформулированы основные положения диссертации, выносимые на защиту. В заключение вводной части описан личный вклад автора и перечислены публикации в журналах, индексируемых в базах данных ВАК, Web of Science, Scopus и Russian Scientific Citation Index, написанные в соавторстве с диссертантом.

Первая глава диссертации посвящена детальному описанию современного состояния проблемы об исследовании состава и качества приземного воздуха в крупных городах, при этом отдельное внимание уделяется использованию численных моделей. При написании данной главы диссертант опирается на актуальные работы, написанные исследователями данного направления физики атмосферы. В **разделе 1.1** автор диссертации останавливается на вопросе зарождения интереса к моделированию физико-химических процессов в городском смоге над густонаселенными территориями. Им кратко излагается история возникновения данного вопроса, далее описывается структура численных моделей, их особенности и возникающие при моделировании проблемы, в ходе изложения приводятся ссылки на работы исследователей, где можно найти более детальное описание современных методов решения этих проблем. **Раздел 1.2** представляет собой краткий обзор современных методов исследования динамики загрязнения атмосферы в городах. При этом подчеркивается важность данных измерений для проведения непрерывной валидации результатов моделирования. В данном разделе рассматриваются основные принципы работы наземных сетей наблюдения, а также спутниковых наблюдений, при этом приводятся ссылки на актуальные публикации и современные базы данных, позволяющие получить информацию о содержании ключевых загрязняющих примесей атмосферы. В **последнем разделе первой главы 1.3** излагается проблема решения обратных задач с помощью современных химико-транспортных моделей атмосферы, что позволяет восстанавливать значения входных параметров, таких как, например, начальное распределение полей концентрации загрязняющих примесей, их эмиссий, метеорологические параметры. При этом подчеркивается важность ассимиляционных методов, ведь данные наблюдений, как и модельные расчеты содержат в себе ошибки, вызванные целым набором причин и имеющие сложную неоднородную пространственно-временную структуру. Ассимиляционные методы позволяют объединить информацию, полученную на основании расчетов и наблюдений с целью получения

некоторого оптимального состояния системы. Поэтому в этом разделе работы проводится краткий обзор работ, опивающих основные подходы к решению данной проблемы.

Вторая глава работы описывает результаты проведенной автором работы по анализу данных наблюдения о содержании загрязняющих примесей атмосферы в приземном слое атмосферы Москвы, проводимых на сети станций «Мосэкомониторинг». В **разделе 2.1** приведено описание используемых данных наблюдений и их структура. Перечислены приборы, используемые для их получения. Также приведена карта с расположением наблюдательных постов. Кратко изложен подход к систематизации и обработке данных. **Раздел 2.2** посвящен анализу пространственной изменчивости загрязнения приземного слоя атмосферы Москвы. При этом город был разделен на 5 секторов: Центр (в пределах Садового кольца с диаметром 5 км), СВ, ЮВ, СЗ, ЮЗ.

Для каждого сектора была рассчитана средняя за период наблюдений концентрация (см. Таблица 1). Согласно результатам, характерной особенностью для Москвы является высокий уровень загрязнения воздуха в северо-восточном и северо-западном секторах, поскольку здесь сосредоточены основные промышленные и транспортные источники CO, NO_x и PM_{10}. Как было отмечено ранее станций, измеряющих SO_2 и PM_{10} несколько меньше, однако, полученные для них средние характеристики согласуются с расположением городских источников и данными других антропогенных примесей. Минимум приземной концентрации для примесей CO, NO_x, PM_{10} и SO_2 наблюдаются в юго-западном секторе Москвы, где количество промышленных предприятий невелико.

CO			PM_{10}		
Сектор (количество станций)	**Все станции**	**Фоновые станции**	**Сектор (количество станций)**	**Все станции**	**Фоновые станции**
СВ (4)	0.47±0.08	0.47±0.08	**СВ (0)**	-	-
ЮВ (14)	0.56±0.04	0.55±0.04	**ЮВ (6)**	0.028±0.06	0.028±0.06
ЮЗ (7)	0.45±0.03	0.45±0.04	**ЮЗ (5)**	0.023±0.04	0.023±0.04
СЗ (9)	0.67±0.10	0.52±0.04	**СЗ (3)**	0.028±0.04	0.028±0.04
Центр (8)	0.53±0.06	0.48±0.06	**Центр (4)**	0.026±0.05	0.025±0.04
SO_2			NO_x		
Сектор (количество станций)	**Все станции**	**Фоновые станции**	**Сектор (количество станций)**	**Все станции**	**Фоновые станции**
СВ (2)	0.050±0.012	0.051±0.012	**СВ (4)**	0.079±0.09	0.079±0.09
ЮВ (13)	0.062±0.024	0.062±0.024	**ЮВ (13)**	0.072±0.06	0.071±0.05
ЮЗ (3)	0.038±0.006	0.038±0.006	**ЮЗ (7)**	0.060±0.02	0.058±0.03
СЗ (4)	0.043±0.007	0.035±0.01	**СЗ (7)**	0.078±0.08	0.068±0.05
Центр (4)	0.048±0.004	0.046±0.01	**Центр (7)**	0.064±0.05	0.061±0.05

Таблица 1. Средние приземные концентрации для примесей CO, NO_x, SO_2 и PM10 в мг $м^{-3}$ для четырех секторов и центра Москвы в период 2005-2017 гг., с указанием 95 % доверительного интервала погрешности.

Наличие многоуровнего наблюдательного пункта, расположенного на ТБ «Останкино», проводящего регулярные измерения с 2007 по 2014 гг. на высотах 10, 130, 248, 348 метров, позволило построить вертикальные профили CO, NO, NO_2. Содержание монооксида азота быстро уменьшается с высотой, достигая своей средней фоновой концентрации на высотах около 150 метров, что объясняется его взаимодействием с озоном и переходом в NO_2. Концентрация NO_2 в слое до 150 метров почти не изменяется с высотой, при этом её среднее значение варьирует в достаточно широком диапазоне. Однако, начиная с высот выше 150

метров начинает стремительно убывать, как среднее значение содержание NO_2, так и его вариации, достигая своего фонового значения на высоте около 300 метров. Концентрация CO уменьшается до высоты 130 метров, поскольку его основной источник – автотранспорт расположен на поверхности. Однако, в пределах 130-248 метров, его содержание возрастает и достигает своего минимального уровня только на высоте 300-350 метров. Это явление скорее всего вызвано выбросами из труб от крупных тепловых и электростанций, работающих на природном газе.

Последний **раздел второй главы 2.3** описывает результаты, полученные для межгодовой и сезонной изменчивости загрязнения приземного слоя атмосферы Москвы. Автором работы было показано, что в Москве наблюдается снижение содержания примесей CO, NO, NO_2, PM_{10}, NMHC (nonmethane hydrocarbons). При это были получены их тренды межгодовой изменчивости, значения которых оказались отрицательными и составили, соответственно: -5.2±0.5, -7.6±0.5, -1.2±0.6, -4.7±2,1, -4.5±1,8 [% год$^{-1}$]. Изменения среднегодового содержания атмосферных загрязняющих примесей в основном определяются погодными условиями и активностью их антропогенных источников. Поэтому такая динамика загрязнения может быть объяснена обновлением автопарка, введением ограничений на въезд грузового транспорта на территорию Москвы, а также обновлением промышленных предприятий и системы газоснабжения в городе. Согласно приведенным в работе графикам, сезонный ход примесей прежде всего определяется их источниками, а также химическим взаимодействием между собой. Так сезонные изменения примесей SO_2, NO, NO_2, CO выделяемых при работе ТЭЦ, содержат в себе рост средней концентрации этих примесей в самые холодные месяцы года – январь и февраль. В то время, как химическое взаимодействие примесей NO, NO_2, O_3 проявляется в виде весеннего максимума концентрации NO_2, образовывающегося в ходе реакции NO и O_3, что совпадает с весенним максимумом озона. Внутригодовые изменения PM_{10} характеризуется его существенным увеличением в апреле, что может быть связано с таянием снега и поднятием мелких частиц пыли и противогололедных реагентов в воздух. Сезонные вариации NMHC носят достаточно сложный характер, что скорее всего объясняется тем, что источники этой примеси являются смешанными - как биогенного, так и антропогенного происхождения.

Третья глава диссертации описывает новый подход к получению значений эмиссий загрязняющих примесей атмосферы, рассчитываемых на основе данных концентрационных наблюдений, а не на основе статистических данных о плотности населения, возрасте автотранспорта в городе, используемых для получения инвентаризационных баз данных. В **разделе 3.1** излагается суть предлагаемого подхода к оценке эмиссий. Одним из наиболее

значимых приближений данного подхода к оценке среднегодовых значений городских эмиссий является предположение о достаточно равномерном распределении концентрации загрязняющих примесей атмосферы по территории Москвы. Такое предположение было обосновано графиками, приведенными для зависимости средней за период наблюдений концентрации от расстояния до центра города.

Год	Q(CO), Гг год$^{-1}$	Q(NOx), Гг N г$^{-1}$	Q(SO_2), Гг год$^{-1}$	Q(PM_{10}), Гг год$^{-1}$
2005	760±167	42,3±10,4	9,9±2,9	21,3±6,7
2006	767±173	43,6±10,8	7,2±2,3	24,5±6,3
2007	719±159	42,0±10,4	7,1±2,1	29,1±6,2
2008	695±154	40,7±10,0	3,8±1,2	25,1±6,3
2009	718±156	38,7±9,3	6,7±1,9	25,9±6,3
2010	732±172	39,8±9,8	7,5±2,2	26,8±6,3
2011	678±147	36,3±8,6	9,0±2,3	20,3±6,3
2012	649±144	37,2±8,7	9,9±2,5	20,1±6,3
2013	639±135	39,3±9,1	11,7±3,1	20,9±6,3
2014	638±136	36,8±8,6	9,5±2,5	24,1±6,3
2015	616±124	31,2±7,3	7,1±2,3	18,9±6,3
2016	591±121	28,7±7,2	5,7±2,1	17,4±6,3
2017	580±119	23,6±5,8	5,4±2,1	18,6±6,3
Тренд, % год$^{-1}$	-2,2±0,3	-3,6±0,7	0,3±2,1	-2,7±1,1

Таблица 2. Среднегодовые эмиссии загрязняющих примесей в Москве для 2005 - 2017 годов, для CO, NO_x, SO_2 и PM_{10}, а также их временные тренды.

В итоге, согласно полученным в работе результатам значимые отрицательные тренды получились для примесей CO, NO_x и PM_{10}, они, соответственно, составили −2.2 ± 0.3, −3,6 ± 0.7 и -2,7±1,1 [% год−1]. Такая тенденция вполне согласуется с вариациями среднегодовых концентраций. На фоне общего уменьшения этих примесей заметны увеличения во время холодных зим 2006 и 2010 годов и уменьшения во время теплых зим 2007 и 2008, 2014 годов (см. Таблица 2). Эмиссии SO_2 не обладали значимым трендом, их величина существенно варьировалась в рассмотренный период времени, это связано с увеличением общего количества автомобилей в Москве, а также уменьшения их средней скорости движения, из-за низкой пропускной способности дорог в городе.

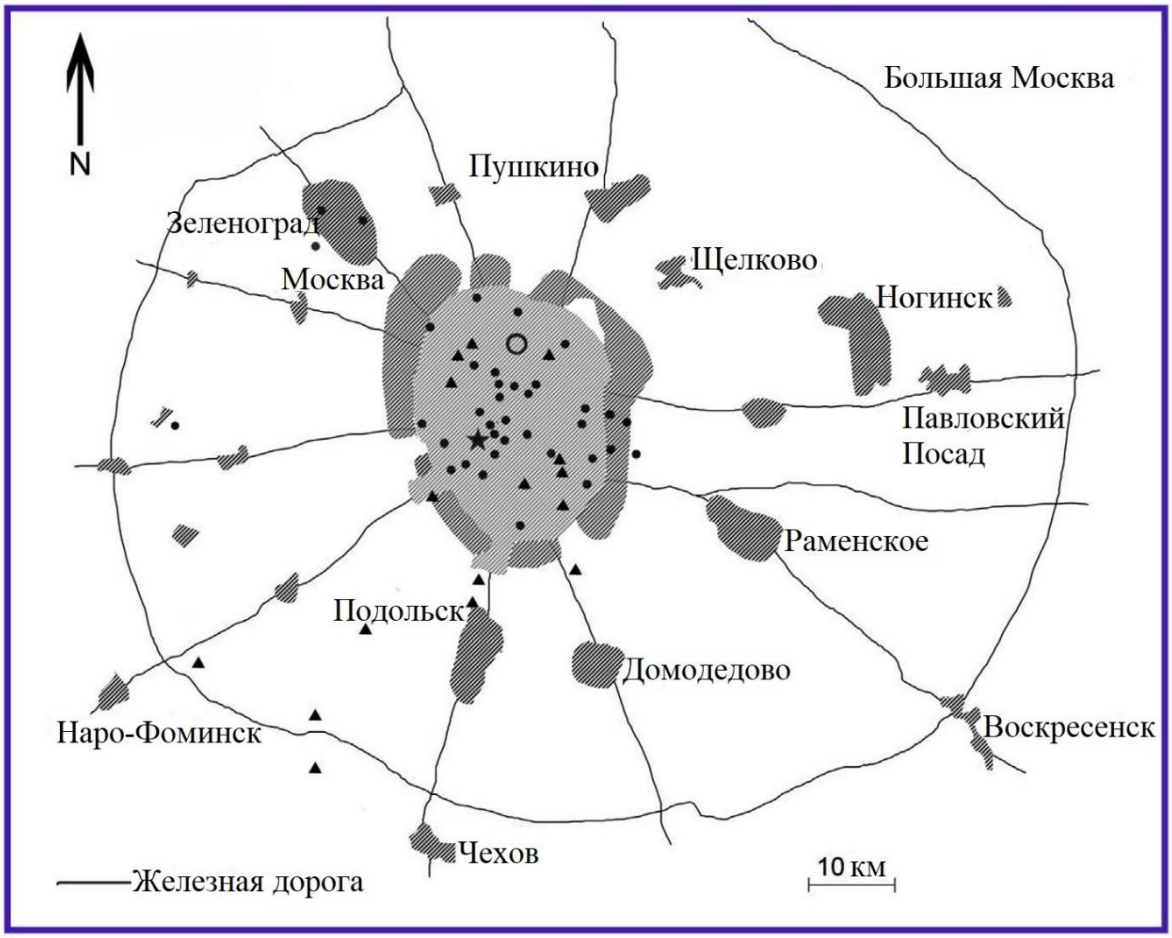


Рисунок 1. Территория Московского мегаполиса и Большой Москвы. Черные точки указывают на положение регулярно работающих станций.

Раздел 3.2 посвящен применению ранее описанного похода оценки эмиссий к территории Большой Москвы, включающей в себя помимо Московского мегаполиса 21 город с общим населением около 1,6 миллиона человек (см. Рисунок 1). При этом автором для оценки потоков эмиссий и интегральных выбросов загрязняющих веществ в этих городах делается предположение, что вертикальные профили концентраций загрязняющих веществ, высота слоя перемешивания и скорость переноса воздушной массы соответствуют значениям,

ранее полученным для Москвы. Это подкрепляется наблюдениями, проведенными в Обнинске и оценками выбросов, полученными для городов и поселков, расположенных вдоль Транссибирской железной дороги, согласно которым различия являются незначительными для городов, если они расположены на равнинной территории и на той же широте, что и мегаполис. В результате проведенных оценок было получено, что период с 2000 по 2010 год, усредненные для 21 города, достаточно мало менялись и приблизительно равны значениям для 2005 года (см. Таблица 3).

Загрязняющая примесь	Города-спутники	Транспорт	Жилой сектор	Москва	Большая Москва
CO	81±28	21±8.4	18±6.3	760±167	884±210
NO_x	5.8±2.3	6.4±2.6	1.5±0.6	42.3±10.4	59±16
SO_2	2.5±1.1	1.1±0.5	0.6±0.3	9.9±2.9	14±4.8
CH_4	21±11	0.6±0.3	4±1.9	206±79	232±92

Таблица 3. Эмиссии загрязняющих примесей на территории Большой Москвы в 2005 году (CO, SO_2, CH_4 приведены в Гг год$^{-1}$, NO_x - в Гг(N)год$^{-1}$).

В заключение главы в **разделе 3.3** диссертации приведены результаты сравнения полученных для Москвы оценок эмиссий с данными баз инвентаризаций, как для Москвы, так и для других мегаполисов мира. Было показано, что значения эмиссий CO, NO_x в Москве и Большой Москве практически совпадают с интерполированными данными инвентаризации EDGAR v 4.2. Однако, аналогичные эмиссии SO_2 и CH_4 получились значительно меньше, это объясняется тем, что авторами инвентаризационных оценок не была учтена модернизация всех тепловых электростанций в городе, проведенная в начале 2000-ых, аналогичные завышенные значения для CH4 были оценены и для других Российских городов. Автором диссертации отмечаются достаточно резкие изменения значений инвентаризационных оценок для европейских городов в процессе изменения методик, применяемых инвентаризациями. Однако, в целом, отрицательные временные тренды CO, NO_x характерные для большинства мегаполисов мира, согласуются с оценками эмиссий, приведенными в диссертации, для Москвы.

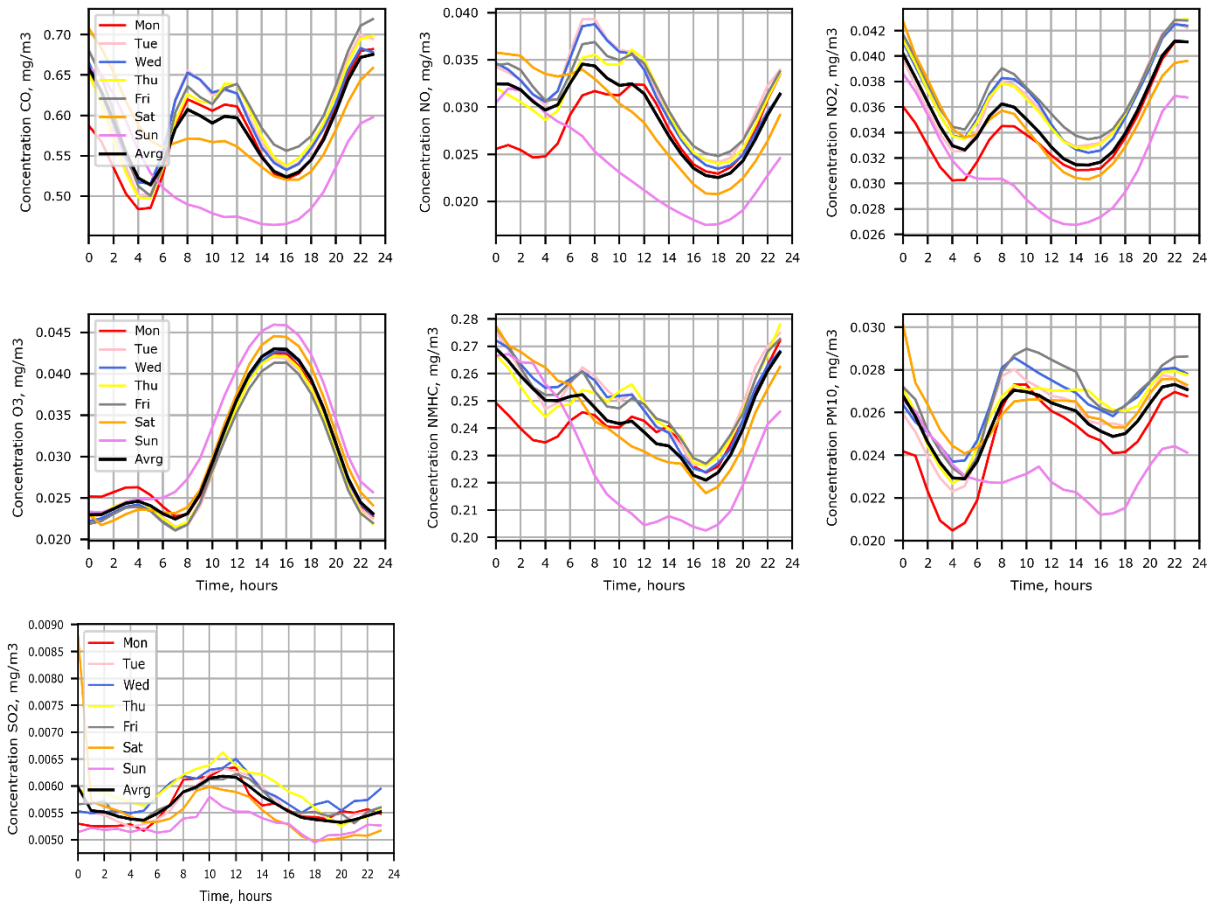


Рисунок 2. Суточные изменения для каждого дня недели и в среднем за неделю для приземных концентраций для примесей CO, NO, NO_2, O_3, NMHC, PM_{10} и SO_2 в Москве, за период с 1 января 2005 по 31 января 2017 гг.

Четвертая глава работы посвящена детальному изучению суточной и недельной изменчивости загрязняющих примесей атмосферы. **В разделе 4.1** автором работы были построены графики среднего за период наблюдений суточного хода концентраций для каждого дня недели, усредненного по всем станциям (см. Рисунок 2). В результате было показано, что недельный цикл проявляется в изменении содержания примесей в выходные дни, по отношению к рабочим дням недели. Это прежде всего связывается с уменьшением активности автотранспорта в Москве в субботу и воскресенье, что приводит уменьшению концентрации для примесей CO, NO, NO_2, PM_{10}, NMHC (розовая линия на Рисунке 2). Для этих примесей отсутствует накопление в утренние часы воскресенья, в результате чего ночь с воскресенья на понедельник оказывается самой чистой за неделю. Озон в свою очередь связан фотохимическим равновесием с оксидами азота, что приводит к повышению его содержания в воскресенье. Недельный эффект SO_2 присутствует, но является не значительным по своей величине.

Раздел 4.2 представляет собой описание результатов, полученных для оценок параметров химического режима озона - одного из основных агентов фотохимического смога в атмосфере над крупными городами. В данном разделе приведены химические реакции, описывающие фотохимические трансформации этой газовой компоненты, включающие основные предшественники озона (ЛОС – летучие органические соединения, NO_x, CO). После этого на основе методов, предложенных и описанных в работах [7, 8], были рассчитаны такие параметры, как отношение NMHC/NO_x и амплитуда его недельной изменчивости, а также величина Ln/Q (Ln – скорость потери органических радикалов в реакциях с NO_x, Q - скорость генерации органических радикалов), усредненные за период 1 января 2005 года по 1 января 2014 года. Согласно полученным оценкам для Москвы характерены высокие концентрации NO_x, вызванные сжиганием больших объемов горючих ископаемых в городе, поэтому ключевым фактором, определяющим изменчивость содержания озона в Москве, является присутствие ЛОС (VOC-limited режим). В этих условиях даже небольшое снижение концентрации ЛОС сопровождается заметным уменьшением концентрации озона. Согласно оценкам, приведенным в работе, на региональных фоновых станциях, удаленных от Москвы, происходит переход от режима ограничения по ЛОС к режиму ограничения по NOx.

В **пятой главе** диссертации рассмотрены результаты работы по адаптации химико-транспортной модели SILAM к условиям в Московском мегаполисе. **Раздел 5.1** дает представление о том, как устроена модель и какова её структура. Здесь перечислены данные, которые необходимо задавать в качестве входных параметров и начальных условий, а также приведены ссылки на работы разработчиков модели, где можно найти подробное описание проведенных ими тестов работы отдельных блоков модели.

Поскольку эмиссии являются одним из ключевых задаваемых параметров при работе химико-транспортной модели и зачастую представляют собой один из основных источников ошибок численных оценок загрязнения атмосферы, то в **разделе 5.2** диссертации была описана серия экспериментов по оптимизации эмиссионной матрицы на примере проведения расчетов для Московского мегаполиса и прилегающих к нему территорий. При этом полученные ранее значения среднегодовых эмиссий загрязняющих веществ (см. Глава 3) с учетом их суточной и сезонной изменчивости, были распределены по узлам сетки с разрешением 0.1^0 по долготе и широте, а также по высоте от 0 до 350 м. Величина эмиссий для каждой ячейки модели задавалась, как произведение среднегородской величины эмиссий в данный момент времени и двух пространственных коэффициентов: первый определялся из зависимости средней концентрации примеси от расстояния от центра города, а второй из распределения концентраций по выбранным секторам (Ц, СЗ, СВ, ЮЗ, ЮВ – аналогично тому, как было

сделано в разделе 2.2). В ходе проведенной серии расчетов для аналогичного периода времени (сначала для одного зимнего месяца, потом для одного летнего месяца) варьировалось задание величины интенсивности источников по вертикали и горизонтали. При подборе вариантов задания эмиссий были учтены особенности пространственно-временной изменчивости источников каждой загрязняющей примеси, а также сопоставления расчетов тестового запуска (с некоторым исходным распределением городских эмиссий) с данными наблюдений для исследуемого периода. Так, например, при задании оксидов азота было учтено влияние выбросов тепловых электростанций и в ячейках, где они располагаются, были заданы дополнительные источники в слое 45–270 м, распределение которых, также варьировалось по высоте. Всего в работе было предложено 4 варианта распределения источников по вертикали, 4 по горизонтали и дополнительно 4 вертикальных распределения в ячейках с ТЭЦ. Одновременно варьируя эти параметры было проведено 80 запусков (4x4x4=64 запуска для зимы, и 4x4=16 запусков для лета, при которых варьировалось только вертикальное распределение).

Для полученных в ходе численных экспериментов оптимальных Московских эмиссий для примесей CO, NO_x были проведены сравнения с аналогичными результатами расчетов SILAM v5_5, но с применением эмиссий TNO-2011 заданными для территории Москвы. Пример, сравнений средней по станциям концентрации CO, полученной в ходе наблюдений и двух запусков модели представлен на Рисунке 3. Коррекция эмиссий позволила улучшить результаты расчетов по сравнению с данными европейской инвентаризации сравнению с результатами расчетов с использованием эмиссий TNO-2011, расчеты с оптимальными эмиссиями, показали лучшее совпадения с наблюдениями, как для CO – коэффициент корреляции увеличился с 0.63 до 0.68, так и для NO_x. В случае оксидов азота коэффициент корреляции увеличился с 0.55 до 0.61 для NO и с 0.71 до 0.73 для NO_2. Также удалось уменьшить амплитуду пиков концентраций, не соответствующих наблюдениям во время присутствия устойчивой воздушной массы над территорией Москвы.

В **разделе 5.3** представлены результаты моделирования с использованием ранее полученных оптимальных эмиссий, при этом была проведена оценка модели воспроизводить пространственную и временную изменчивость качества воздуха в Москве.

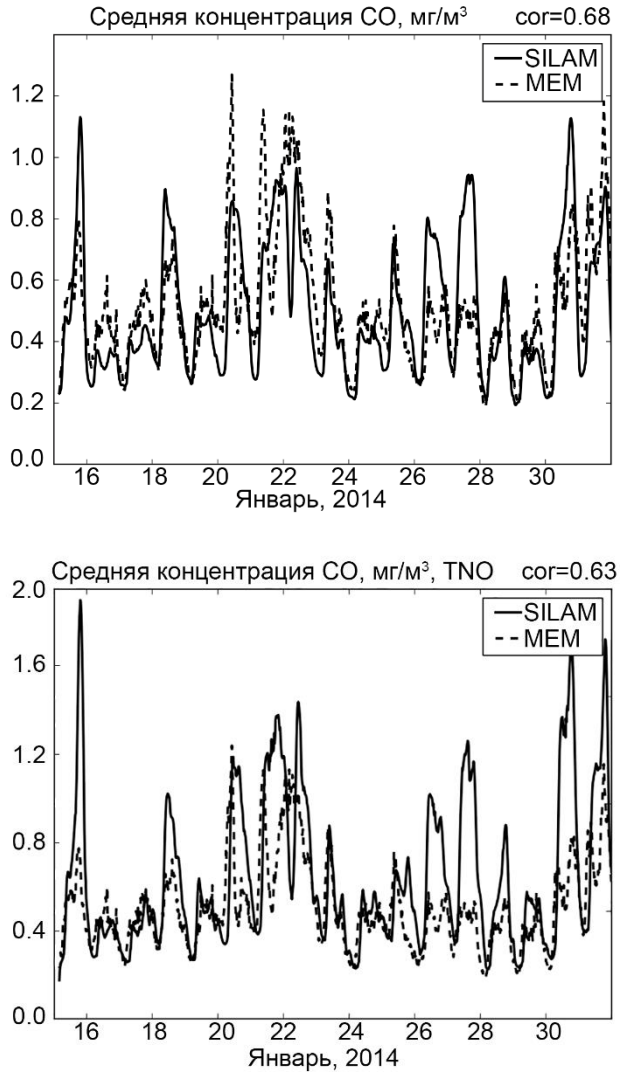


Рисунок 3. Временные ряды средней по Москве концентрации CO за 15-31 января 2014 г, рассчитанные с помощью модели для оптимального варианта эмиссий (вверу) и эмиссий инвентаризации TNO-2011 (внизу) - SILAM, а также полученные в ходе наблюдений сети станций наблюдения «Мосэкомониторинг» - MEM.

Период моделирования для ранее описанных численных экспериментов был выбран с 15-31 января 2014 года, это было сделано не случайно, этот период включал в себя дни с аномальными погодными условия, которые представляют большой интерес для исследования, поскольку приводят к ситуации накопления примеси в мегаполисе и значительному повышению среднесуточной концентрации. Согласно проведенным сопоставлениям с данными наблюдений для индекса загрязнения MPI (multi-pollutant index), характеризующего качество воздуха в городе и определяемого на основе приземных концентраций CO, NO_2, SO_2 и PM_{10}, использование ранее полученных в работе оценок эмиссий позволяет достаточно точно оценить качество воздуха в городе, как в дни с устойчивой воздушной массой, так и в дни, когда устойчивая воздушная масса отсутствовала.

Раздел 5.4 посвящен анализу моделирования вертикальной структуры загрязнения атмосферы, при использовании оптимальной матрицы эмиссий. Наличие данных измерений многоуровнего наблюдательного пункта, расположенного на ТБ «Останкино» позволило провести сопоставления вертикальных профилей загрязняющих примесей CO, NO_2. Сопоставления проводились для летнего периода, когда нагрев нижних слоев атмосферы и рост интенсивности конвективных процессов приводят к перемешиванию и перераспределению загрязнения приземного слоя атмосферы. Автором было показано, что модель воспроизводит основные особенности изменения содержания загрязняющих примесей с высотой, об этом свидетельствует совпадение значений концентраций и величин их среднеквадратических отклонений. Как для наблюдений, так и для расчетов прослеживается уменьшение абсолютного значения градиента концентрации с высотой, что можно объяснить наличием основных источников этих атмосферных примесей у поверхности (сжигание полезных ископаемых – автотранспорт), а также присутствием источников на высотах 150 – 250 метров, таких как трубы ТЭЦ (см. Рисунок 4).

В заключении радела были построены вертикальные профили CO, NO_2, рассчитанные для точек внутри Москвы и за её пределами для периодов с разным направлением ветра. Такой подход позволил не только качественно, но и количественно продемонстрировать влияние Московского мегаполиса на региональный состав атмосферы, а также продемонстрировать влияние промышленных центров, расположенных на востоке от города в дни с восточным направлением ветра.

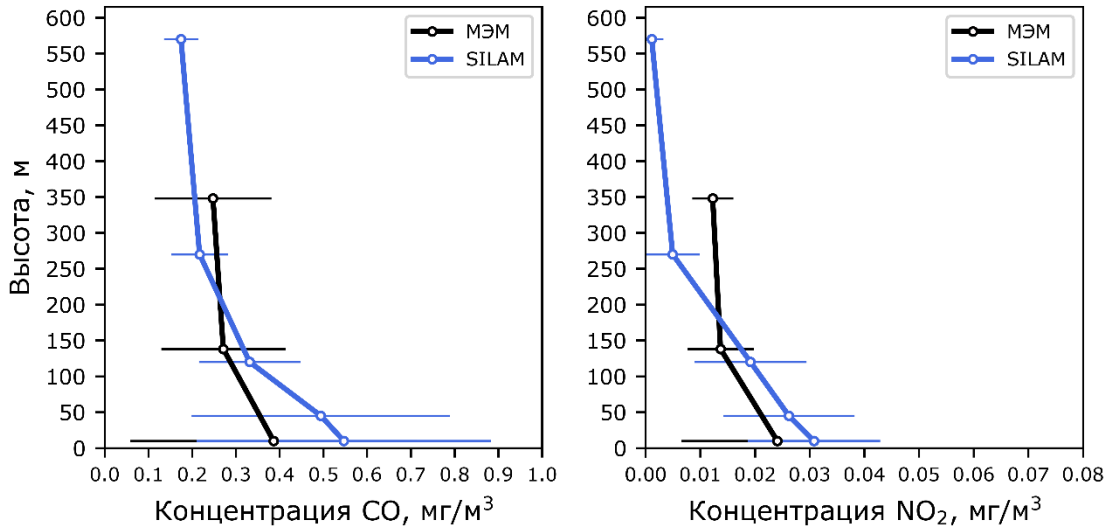


Рисунок 4. Вертикальные профили концентраций CO (мг/м^3) (а) и NO_2 (мг/м^3) (б), измеренных на многоуровневом пункте «Останкино» сети станций «Мосэкомониторинг» - МЭМ (черная

кривая) и расчеты SILAM (синяя кривая), при использовании оптимального распределения эмиссий в модельных расчетах, осредненные для июля 2014 года.

Последний **раздел пятой главы 5.5** посвящен анализу результатов моделированию озона и его химического режима. В начале 2020 года на базе ХТМ SILAM с непосредственным участием диссертанта была создана система автоматических прогнозов содержания загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы Московского региона (регулярно обновляемые результаты расчетов можно найти, перейдя по ссылке: http://ifaran.ru/silam/index.html). Полученные результаты расчетов этой системы для периода 10 января 2020 – 16 июня 2020 года были использованы в данной работе для проведения оценок возможности моделирования химического режима озона в Москве и на прилегающих территориях. При этом автором были приведены результаты моделирования содержания ЛОС в Москве и за её пределами, а также результаты оценок одного из основных критериев, характеризующих режим озона, отношения концентраций NOx и ЛОС. Согласно приведенным сопоставлениям диаграммам отношения NMVOC (nonmethane volatile organic compunds)/NOx, рассчитанного с помощью ХТМ SILAM и измеренного отношения $NMHC/NO_x$ на станциях «МГУ» и «Звенигород», за период расчетов 10 января 2020 – 16 июня 2020 года, результаты моделирования согласуются с данными наблюдений. Как и в случае результатов, полученных по многолетним наблюдениям в главе 4, моделируемые поля озона и его предшественников демонстрируют ограниченный по ЛОС режим озона (VOC-limited), когда даже небольшое снижение концентрации ЛОС сопровождается заметным уменьшением концентрации озона.

В **шестой главе** работы представлены результаты анализа пространтвенно-временной изменчивости ошибок расчетов, а также рассмотрен подход к построению динамико-статистической модели ошибок, позволяющей проводить коррекцию модельных полей концентраций и прогнозировать их неопределенность с временем заблаговременности 24 – 48 часов. **Раздел 6.1** представляет собой вводную часть главы, где автором описаны проблемы, возникающие в ходе валидации транспортно-химических моделей. В **разделе 6.2** анализируется пространственная изменчивость ошибок для ранее описанных численных экспериментов 2014 года (отдельно для летнего и зимнего месяцев). В результате было продемонстрировано, что модельные поля концентраций более гладкие, их отклонения от среднегородской величины существенно меньше чем у наблюдаемых концентраций, ряды которых содержат в себе достаточно большое количество скачков от среднего по городу и соответственно существенно большую пространственную дисперсию. Также в работе была принята попытка систематизировать эти скачки по пространству и проверить имеют ли они

структуру, зависящую от типа и расположения станций. Однако, как показывает Рисунок 5, ошибки SILAM скорее носят случайный ("мозаичный") характер - т.е. среднее по городу для расчетов примерно совпадает с наблюдениями (для летнего месяца получаются аналогичные результаты), но при сопоставлении локальных рядов (без усреднения) та или иная станция достаточно случайным образом может сильно отклониться от расчетов.

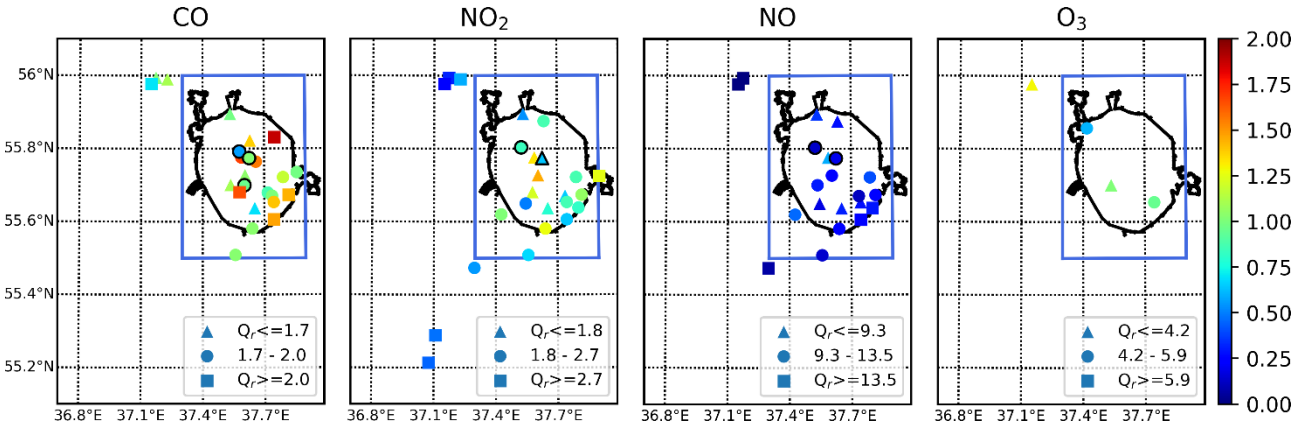


Рисунок 5. Пространственное распределение медиан отношения модельных расчётов и измерений на сети станций МЭМ концентраций CO, NO_2, NO и O_3 для периода 1-31 января 2014 г. Характерная величина относительного интерквартильного разброса Q_r на каждой станции, представлена в виде типа маркера (треугольник, круг и квадрат).

Поэтому в дальнейшем при построении модели ошибок автором работы было решено использовать среднегородские величины, ведь методики типа фильтра Калмана существенно неустойчивы к большим скачкам в рядах, интересующих нас переменных состояния системы.

В **разделе 6.3** приведены результаты анализа временной изменчивости расчетов. В работе было показано, что несмотря на то что средний суточный ход ошибок расчетов имеет достаточно большую величину, как в летний, так и в зимний периоды, усреднение рядов отношения модельных и наблюдаемых концентраций, позволяет получить гладкие и достаточно медленно меняющиеся кривые, которые можно корректировать с помощью фильтра Калмана. Таким образом, опираясь на полученные в данной главе результаты, автором был предложен подход по коррекции расчетов в ходе постобработки данных, при этом медленная компонента ошибок расчетов учитывается с помощью стандартной процедуры фильтрации Калмана, а

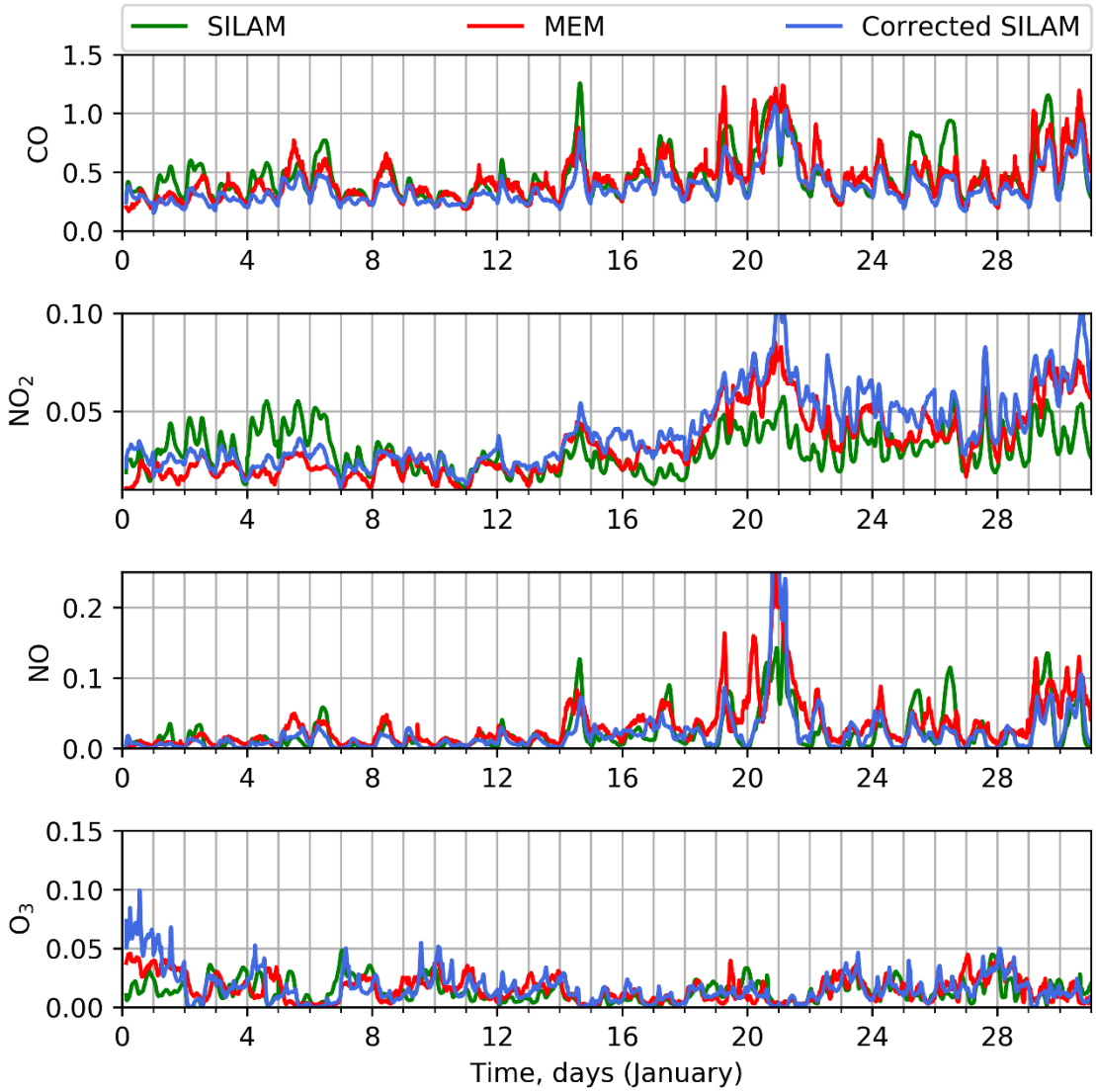


Рисунок 6. Результат применения Калмановской фильтрации и внутрисуточной коррекции для прогноза на ближайшие сутки средних по Москве концентраций CO, NO_2, NO и O_3 (синяя линия), расчеты модели SILAM (зеленая линия) и данные измерений на станциях МЭМ (красная линия) для января 2014 года.

быстро изменяющаяся компонента ошибок учитывается на основе ошибок среднего суточного хода концентраций. **Раздел 6.4** посвящен детальному описанию предлагаемого в работе подхода коррекции расчетов. Согласно результатам, учет спектральных свойств ошибок модели позволяет существенно снизить величину систематической ошибки. Большая часть максимумов и минимумов рядов, скорректированных в процессе постобработки расчетов SILAM, лучше соответствует результатам наблюдений для всех примесей, как в летний, так и в зимний периоды года (см., например, Рисунок 6).

В последнем **разделе шестой главы 6.5** диссертации демонстрируется, что в отдельных случаях параметры, определяющие перемешивание воздуха между высотными слоями атмосферы, такие как, например, высота пограничного слоя приводят к существенному росту ошибок модельных оценок содержания загрязняющих примесей. Для коррекции результатов численного моделирования в периоды таких случаев простого сопоставления концентраций расчетов с измерениями уже недостаточно, при этом необходимо учитывать и неточности задания метеорологических переменных и ошибки параметризаций процессов турбулентности в модели.

В **заключении** диссертации описаны, полученные в ходе проведенной работы результаты. Автором в ходе проведенного анализа пространственной изменчивости многолетних рядов данных наблюдений сети станций «Мосэкомониринг» для таких составляющих атмосферы, как: CO, NO, NO_2, CH_4, SO_2 и PM_{10} было показано, что концентрации CO, NO, NO_2, SO_2 и PM_{10}, основным источником которых является автотранспорт, достаточно равномерно распределены по территории мегаполиса. В то время, как содержание CH_4 возрастает при удалении от центра города вместе с повышение плотности жилой застройки.

Анализ межгодовой изменчивости выявил, что концентрации всех загрязняющих веществ, за исключением O_3, снижались с достаточно высокими скоростями: -5.2±0.5, -7.6±0.5, -1.2±0.6, -4.7±2,1, -4.5±1,8 и -2.1±2.4 %/год$^{-1}$ для CO, NO, NO_2, PM_{10}, NMHC и SO_2, соответственно.

Отдельное внимание в работе было уделено изучению недельного цикла составляющих атмосферы, а также его связи с химическим режимом озона. Полученные характеристики амплитуды недельной гармоники временных рядов загрязняющих веществ для Москвы показывают существенные различия между будними и воскресными концентрациями. Для дневных значений (08: 00–22: 00) эти различия, усредненные за 10-летний период измерений на 49 станциях, составляют 23.9, 16.7, 13.6, 6.3, 7.6 и 14.5 % для NO, NO_2, CO, NMHC, SO_2 и PM_{10}, соответственно. Впервые для Москвы были рассчитаны и проанализированы основные параметры, позволяющие описать ключевые процессы, связанные с химией озона (изменчивость во времени концентрации O_x и соотношений NMHC / NO_x и Ln / Q). Согласно полученным результатам, высокие концентрации NO_x, вызванные сжиганием больших объемов горючих ископаемых в городе, приводят к тому, что ключевым фактором, определяющим изменчивость содержания озона в Москве, является присутствие ЛОС (VOC-limited режим).

Особенно важными являются результаты оценки эмиссий загрязняющих веществ, впервые рассчитанные для Москвы по концентрационным наблюдениям с помощью нового метода. Эти оценки были впоследствии использованы при адаптации транспортно-химической модели SILAM. Диссертантом были проведены серии численных экспериментов с целью оптимизации значений эмиссионной матрицы, при этом варьировалось распределение и интенсивность Московских источников, что позволило, сопоставляя расчеты и наблюдения, существенно снизить ошибки модельных оценок.

Расчеты, проведенные для летнего и зимнего периодов (15-31 января 2014 года и 18-31 июля 2014 года), показали, что использование оптимизированных эмиссий позволяет успешно проводить расчеты о составе и качестве воздуха в Московском мегаполисе в периоды аномальных погодных условий, приводящих к существенному росту атмосферного загрязнения в городе. При этом было также продемонстрировано, что модель успешно воспроизводит вертикальное распределение концентрации CO и NO_x. Построение высотных профилей содержания загрязняющих примесей атмосферы для станций, расположенных в городе и за городом, позволяет не только количественно и качественно оценить влияние Московского мегаполиса на региональный состав атмосферы, но и продемонстрировать влияние промышленных центров, расположенных на востоке от города в дни с восточным направлением ветра. Оценка отношения содержаний оксидов азота и органических компонентов атмосферы (NMHC – nonmethane hydrocarbons для измерений, ЛОС для расчетов) демонстрирует результаты, согласующиеся с ранее полученными и свидетельствует о том, что модели SILAM удается воспроизвести ограниченный по ЛОС режим озона.

В заключение, отдельное внимание было уделено детальному анализу ошибок расчетов. В работе были выявлены пространственные и временные особенности изменчивости ошибок модельных расчетов. Также в работе был рассмотрен динамико-статистический подход, позволяющий описывать медленную и быструю компоненты неопределенности модельных оценок. Согласно результатам, учет спектральных свойств ошибок модели позволяет существенно снизить величину систематической ошибки. Большая часть максимумов и минимумов рядов, скорректированных в процессе постобработки расчетов SILAM, лучше соответствует результатам наблюдений для всех примесей, как в летний, так и в зимний периоды года.

Список используемых источников:

1. Molina M.J., Molina L.T. Megacities and Atmospheric Pollution // Journal of the Air & Waste Management Association. — 2004. — v.54. — pp.644-680. DOI:10.1080/10473289.2004.10470936
2. Molina M., Zaelke D., Sarma K., Andersen S., Ramanathan V., Kaniaru D. Reducing abrupt climate change risk using the Montreal Protocol and other regulatory actions to complement cuts in CO2 emissions // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. — 2009. — v.106. — pp.20616-20621. DOI: 10.1073/Pnas.0902568106
3. Kuenen J., Denier van der Gon H., Visschedijk A., van der Brugh H., Finardi S., Radice P., d'Allura A., Beevers S., Theloke J., Uzbasich M., Honore C., Perrussel O. MEGAPOLI Scientific Report 10-17. A Base Year (2005) // MEGAPOLI European Gridded Gridded Emission Inventory (Final Version). — 2010. — Utrecht. Netherlands. — pp. 39
4. Butler T.M., Lowrence M.G., Gurjar B.R., van Aardenne J., Schultz M., Lelieveld J. The representation of emission from megacities in global emission inventories. // Atmos. Environ. — 2008. — v.42. — pp.703-719. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2007.09.060
5. Kuenen J.J.P., Visschedijk A.J.H., Jozwicka M., Denier van der Gon H.A.C. TNOMACC_II emission inventory; a multi-year (2003-2009) consistent high-resolution European emission inventory for air quality modeling // Atmos. Chem. Phys. — 2014. — v.14. — pp.10963-10976. http://dx.doi.org/10.5194/ acp-14-10963-2014
6. Pommier M., McLinden C.A., Deeter M. Relative changes in CO emissions over megacities based on observations from space // Geophys. Res. Lett. — 2013. — v.40. — pp.3766-3771. https://doi.org/10.1002/grl.50704
7. Kleinman L.I. The dependence of tropospheric ozone production rate on ozone precursors // Atmos. Environ. — 2005. — v.39. — pp.575–586. https://doi.org /10.1016/j.atmosenv.2004.08.047.
8. Stephens S., Madronich S., Wu F., Olson J.B., Ramos R., Retama A., Munoz R. Weekly patterns of Mexico City's surface concentrations of CO, NO_X, PM_{10}, and O_3 during 1986–2007 // Atmos. Chem. Phys. — 2008. — v.8. — pp.5313–5325. https://doi.org/10.5194/acp-8-5313-2008.

Список публикаций автора по теме диссертации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 14 работах, из которых 6 статьи в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus и Russian Scientific Citation Index и в базе ВАК, и 8 тезисов российских и международных конференций.

Статьи в журналах:

1. Elansky N.F., Ponomarev N.A., Verevkin Y.M. Air quality and pollutant emissions in the Moscow megacity in 2005–2014 // Atmospheric Environment. 2018. v.175. pp.54-64. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.11.057 (Web of Science: 4.039)

2. Еланский Н.Ф., Шилкин А.В., Семутникова Е.Г., Захарова П.В., Ракитин В.С., Пономарев Н.А, Веревкин Я.М. Недельный цикл содержания загрязняющих примесей в приземном воздухе г. Москвы // Оптика атмосферы и океана. 2018. т.31. с.829-836. DOI: 10.15372/AOO20181009 (Scopus: 0.89)

Перевод: Elansky N.F., Shilkin A.V., Semutnikova E.G., Zaharova P.V., Rakitin V.S., Ponomarev N.A., and Verevkin Y.M. Weekly Cycle of Pollutant Concentrations in Near-Surface Air over Moscow // Atmospheric and Oceanic Optics. 2019. v.32. pp.85–93. https://doi.org/10.1134/S1024856019010068 (Scopus: 1.32)

3. Elansky N.F., Shilkin A.V., Ponomarev N.A., Semutnikova E.G., Zakharova P.V. Weekly patterns and weekend effects of air pollution in the Moscow megacity // Atmospheric Environment, 2020. v. 224. pp.117303. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117303 (Web of Science: 4.798)

4. Ponomarev N., Yushkov V., Elansky N. Air Pollution in Moscow Megacity: Data Fusion of the Chemical Transport Model and Observational Network // Atmosphere. 2021. v.12. pp.374-393. https://doi.org/10.3390/atmos12030374 (Web of Science: 2.686)

5. Пономарев Н.А., Еланский Н.Ф., Кирсанов А.А., Постыляков О.В., Боровский А.Н., Веревкин Я.М. Применение химико-транспортных моделей атмосферы для валидации эмиссий загрязняющих примесей в Москве // Оптика атмосферы и океана. 2020. т.33. с. 119-126. DOI: 10.15372/AOO20200206 (Scopus: 1.64)

Перевод: Ponomarev N.A., Elansky N.F., Kirsanov A.A., Postylyakov O.V., Borovski A.N., Verevkin Y.M. Application of Atmospheric Chemical Transport Models to Validation of Pollutant Emissions in Moscow // Atmospheric and Oceanic Optics. 2020. v.33(4). pp.362–371. (Scopus: 1.64)

6. Пономарев Н.А., Еланский Н.Ф., Захаров В.И., Веревкин Я.М. Оптимизация эмиссий загрязняющих примесей для моделирования качества воздуха в Москве // Процессы в геосредах. 2019. № 1. с. 65-73 (RSCI: 0.181)

Перевод: Ponomarev N.A., Elansky N.F., Zakharov V.I., Verevkin Y.M. Optimization of Pollutant Emissions for Air Quality Modeling in Moscow // Processes in GeoMedia. 2020. v. 1. Springer Geology. pp.137-147. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38177-6_16 (RSCI: 0.181)