

УДК 551.510.42,551.510.411,519.25

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ В ВОЗДУШНОМ БАССЕЙНЕ МОСКВЫ И ИХ ЭМИССИИ

© 2022 г. Н. Ф. Еланский^а, А. В. Шилкин^{а, б, *}, Н. А. Пономарев^{а, с},
П. В. Захарова^д, М. Д. Качко^е, Т. И. Поляков^е

^аИнститут физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, г. Москва, 119017 Россия

^бФГБУ “НПО “Тайфун”, ул. Победы, 4, г. Обнинск, 249031 Россия

^сМосковский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
ул. Ленинские горы, 1–2, г. Москва, 119234 Россия

^дГПБУ “Мосэкомониторинг”, ул. Новый Арбат, 11, стр. 1, г. Москва, 119019 Россия

^еРоссийский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева,
Миусская пл., 9, г. Москва, 125047 Россия

*e-mail: shilkin@rpatyphoon.ru

Поступила в редакцию 30.08.2021 г.

После доработки 04.10.2021 г.

Принята к публикации 07.10.2021 г.

Расположение Московского мегаполиса на равнине, в более высоких широтах по сравнению с другими мегаполисами, создает особые условия для химической трансформации загрязняющих примесей в городской атмосфере, их переноса и накопления. Авторами обработаны и проанализированы данные наблюдений приземных концентраций NO, NO₂, CO, CH₄, O₃, неметановых углеводородов (НМУВ) и аэрозолей (PM₁₀), полученные на сети станций ГПБУ “Мосэкомониторинг” за период с 2005 по 2020 г. Рассчитаны временные и пространственные параметры, характеризующие динамику атмосферного загрязнения воздушного бассейна Москвы. Отмечено уменьшение содержания в городском воздухе большинства загрязняющих примесей, что объясняется обновлением автопарка, введением ограничений въезда на территорию города грузового транспорта, а также модернизацией промышленных предприятий, очистных сооружений и системы газоснабжения. Значимые отрицательные тренды получены для НМУВ, CO, NO_x и PM₁₀, соответственно, 4.3, 4.0, 2.6 и 1.7% год⁻¹. Незначимый отрицательный тренд получен для O₃ и его отсутствие – для CH₄. Выполнены расчеты суммарных выбросов от городских источников тех веществ, которые определяют качество воздуха. Их величины также демонстрируют отрицательные тренды. В течение продолжительного периода практически не изменилось содержание озона, что говорит о слабой чувствительности окислительных свойств московской атмосферы и скорости образования озона к изменениям содержания в воздухе азотных радикалов и их высокой чувствительности к летучим органическим соединениям.

Ключевые слова: атмосфера мегаполиса, состав атмосферы, качество воздуха, эмиссии, загрязняющие примеси, приземные концентрации, суточные и сезонные вариации, недельный цикл

DOI: 10.31857/S0002351522010023

1. ВВЕДЕНИЕ.

Рост в мире городского населения, увеличение занимаемой городами территории, инфраструктурные изменения, применение новых материалов и технологий оказывают воздействие на состав атмосферы и на состояние климатической системы. В то же время, все отчетливее проявляется и обратное влияние изменения климата на качество воздуха в городах. Выбор пути устойчивого развития для каждой страны требует последовательной модернизации системы мониторинга состава атмосферного воздуха, детального изучения

действующих в городской атмосфере механизмов физико-химической трансформации загрязняющих примесей и образования экстремальных ситуаций [1–5]. 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 [6–8]. Эти меры должны предусматривать не только общее снижение антропогенных выбросов, но и изменение их состава, оказывая тем самым влияние на окислительные свойства го-

родского 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. В настоящее время для моделирования используются данные глобальных и региональных инвентаризаций эмиссий, в том числе европейской, рассчитанные примерно для 40 видов источников [9]. Из-за многообразия источников и условий, в которых они действуют, и необходимости использования многочисленных предположений результаты расчетов, полученные разными группами экспертов, сильно различаются [4, 10, 11; Megapoli (<http://megapoli.info/>); TNO (<https://topas.tno.nl/emissions/>); EDGAR (<https://edgar.jrc.ec.europa.eu/>); CAMS-REG-AP (<https://atmosphere.copernicus.eu/>); ACCMIP (<https://www.giss.nasa.gov/projects/accmip/>)]. Это обстоятельство заставляет обратить особое внимание на прямые измерения эмиссий в городе. Оценки эмиссий для Московского мегаполиса, например, по данным измерений концентрации примесей на сети московских станций в 2005–2014 гг., представленные в [12, 13], показали ошибочность расчетных инвентаризаций для большинства химических соединений, причем по некоторым компонентам расхождения составляли 400 и более процентов.

Москва с населением около 13 млн человек занимает 15-место среди крупнейших мегаполисов мира по количеству населения и находится в лидерах по плотности населения. В последние три десятилетия город быстро разрастался, захватив ближайшие окрестности за пределами его официальной границы, проходящей в основном по Московской кольцевой автодороге (МКАД). Исторически сложившаяся городская застройка близка к круговой, а отсутствие в ближайших окрестностях крупных промышленных центров, позволяет считать Москву изолированным городом, что отличает ее от других мегаполисов. Расположение Москвы на равнине в более высоких широтах также является важным отличием от других мегаполисов. За последние 30 лет в Москве произошли большие изменения в городской инфраструктуре и в состоянии промышленности. Количество автомобилей за этот период увеличилось с 2 до 6 млн. Промышленное производство выросло на 10%, но при этом прекратили работу крупные предприятия, вносящие основной вклад в загрязнение атмосферы [14; <https://www.fedstat.ru/>]. Москва стала финансово-административным центром с близким для таких городов составом антропогенных эмиссий [15]. В настоящее время качество воздуха в Москве, в большей степени, зависит от автотранспорта, городской инфра-

структуры, метеорологических и климатических изменений [13, 16, 17].

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/>]. Образованная в 2002 г. сеть автоматических станций, непрерывно ведущих измерения, первоначально включала 11 станций, а в 2010-х годах выросла до 56. Станции более или менее равномерно распределены по территории Москвы. Для контроля регионального фона загрязнения атмосферы 10 станций размещено за пределами территории мегаполиса (рис. 1). На телевизионной башне в Останкино, расположенной в 7 км к северу от центра города, ведутся измерения на высотных уровнях 10, 130, 248 и 348 м. По количеству станций, принципу их размещения, методам и периодичности измерений сеть станций МЭМ удовлетворяет требованиям Всемирной метеорологической организации, предъявляемым к системам контроля качества воздуха в городах. В соответствии с принятыми в последние годы законодательными актами в области экологической политики России (Указ Президента РФ от 08.02.2021, Федеральный Закон от 02.07.2021 и др.) московская система мониторинга атмосферы продолжает развиваться.

Общие с другими мегаполисами основные источники загрязнения (автотранспорт, промышленные и коммунальные объекты, жилищный сектор) сближают Москву по качеству воздуха с мегаполисами США, Японии и крупными европейскими городами [12]. Анализ содержания в воздухе загрязняющих примесей CO, NO, NO₂, SO₂, и PM₁₀, проведенный в [12] показал, что по классификации Гурджара [3] Москва к 2010 г. по качеству воздуха перешла из группы 6-ти самых загрязненных городов (всего рассматривалось 19 самых крупных мегаполисов мира с населением более 12 млн человек) в число 6-ти самых чистых. Однако надо учитывать, что существует некоторый произвол в выборе территории, для которой определяются качество воздуха и эмиссий примесей. В разных публикациях даются оценки для изолированных городов, городов с промышленными окрестностями, городских агломераций и целых провинций, что сильно затрудняет или делает невозможным проведение сравнений качества воздуха и антропогенных эмиссий.

Продолжение регулярных наблюдений содержания газовых примесей и аэрозолей на сети станций МЭМ в последние годы позволяет уточнить, поправить и пополнить полученные ранее [18–21] характеристики пространственно-временной изменчивости состава приземного слоя атмо-

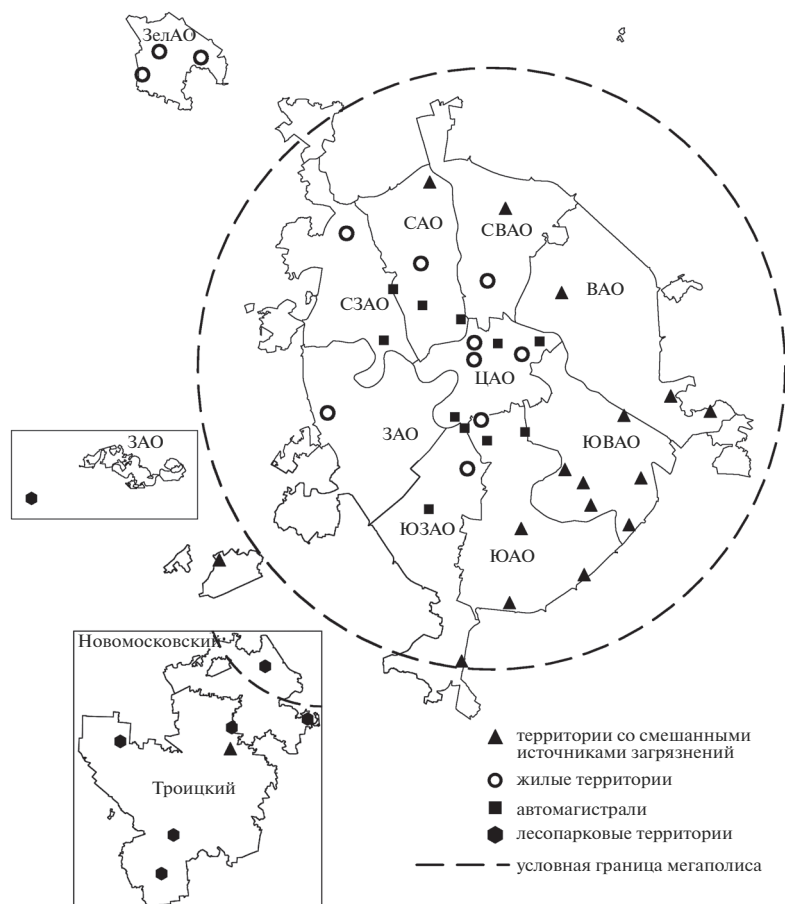


Рис. 1. Расположение станций Мосэкомониторинга на карте Москвы и принятая их классификация по типу окружающей местности и преобладающим источникам загрязнения атмосферы [https://mosecom.-mos.ru/].

сферы в Московском мегаполисе. Использование метода, основанного на расчете функций распределения концентрации различных примесей, позволяет повысить эффективность фильтрации данных и минимизировать потерю информации. Значительно расширенная база данных используется для оценки интегральных эмиссий в атмосферу с территории Московского мегаполиса ключевых газовых примесей и аэрозолей, а также для анализа их годовой изменчивости. Поскольку Москва может рассматриваться как изолированный город, то оценки качества воздуха и величины эмиссий в настоящей работе даются, как и ранее [13, 18], для территории со средним радиусом равным 25 км, в которую включаются новые слившиеся с Москвой жилые районы (рис. 1). Ранее исследование проводилось по данным 48 станций

МЭМ, а в настоящей работе использовались данные 56 станций.

2. ОБРАБОТКА И ФИЛЬТРАЦИЯ ДАННЫХ

Для определения характеристик временной изменчивости качества воздуха в Московском мегаполисе использовались осредненные по 20 минутам значения концентрации в приземном слое атмосферы CO , NO , NO_2 , CH_4 , O_3 , суммарного содержания неметановых углеводородов (НМУВ) и массы аэрозольных частиц размером менее 10 мкм (PM_{10}), полученные на сети станций МЭМ в период с 1 января 2005 г. по 31 декабря 2020 г. К началу этого периода до нескольких десятков выросло число станций, была проведена оптимизация комплектации станций современными

Таблица 1. Среднее за период 2005–2020 гг. относительное количество станций, на которых проводились непрерывные измерения примесей. Общее число станций равно 56

Примесь	CH_4	CO	NO	NO_2	НМУВ	O_3	PM_{10}
Относительное число станций, %	45	90	80	80	45	30	55

дорогостоящими средствами наблюдений, обработаны стандартные методики измерений и калибровки приборов. В табл. 1 показано количество станций (в процентах относительно их общего числа – 56), проводивших непрерывные измерения указанных примесей в течение 2005–2020 гг.

Ряды данных о загрязнениях, получаемые на сети станций МЭМ, имеют большое количество выбросов из своих статистических распределений. Это, прежде всего, связано не только с физическими явлениями в приземном слое атмосферы (ПСА) такими как частые инверсии и устойчивые стратификации ПСА в городских застройках, но и случайные выбросы за счет расположения рядом со станцией автомобиля с работающим двигателем или другого источника.

Помимо выбросов в рядах данных часто наблюдаются отрицательные значения, фиксируемые сразу после калибровки оборудования, и нулевые значения, которые регистрируются при концентрации примесей ниже порога чувствительности измерительных приборов. Все значения меньше или равные нулю подлежали удалению из общей выборки с использованием простых рамок. Для удаления выбросов в рядах, имеющих большое количество разнопериодных колебаний, использовались специальные фильтры.

В процессе работы с данными наблюдений нами были построены функции плотности вероятности для каждой загрязняющей примеси, при этом выборка значений состояла из массива из-

мерений за каждый год по всем станциям. В качестве потенциальных аппроксимирующих функций были использованы двухпараметрические распределения, такие как: нормальное, логнормальное, Пирсона, Хи и Лапласа. С помощью метода максимального правдоподобия (*MLE – Maximum likelihood estimation*) были найдены наиболее вероятные параметры, описывающие функции распределения рядов данных. На рис. 2 приведен пример, полученных результатов.

Функции распределения большинства примесей не являются симметричными, для их описания больше подходит логнормальная аппроксимация, а не часто используемая нормальная. Достаточно большая изменчивость во времени и наличие резких возрастаний концентрации, особенно в моменты аномальных погодных условий, приводят к тому, что правый хвост распределения вносит существенный вклад в оценку среднего. Этот факт важно было учитывать при проверке качества данных и выборе метода их фильтрации. Исключением являются данные измерений метана, их функция распределения оказалась симметричной и хорошо аппроксимируемой с помощью распределения Лапласа. Данный результат вполне закономерен, поскольку CH_4 является достаточно пассивной примесью и обладает наибольшим временем жизни из всех рассматриваемых в данной работе примесей, его концентрация меняется достаточно медленно и в небольших пределах.

Ряды данных наблюдений на каждой станции всех примесей кроме CH_4 не имеют явного нор-

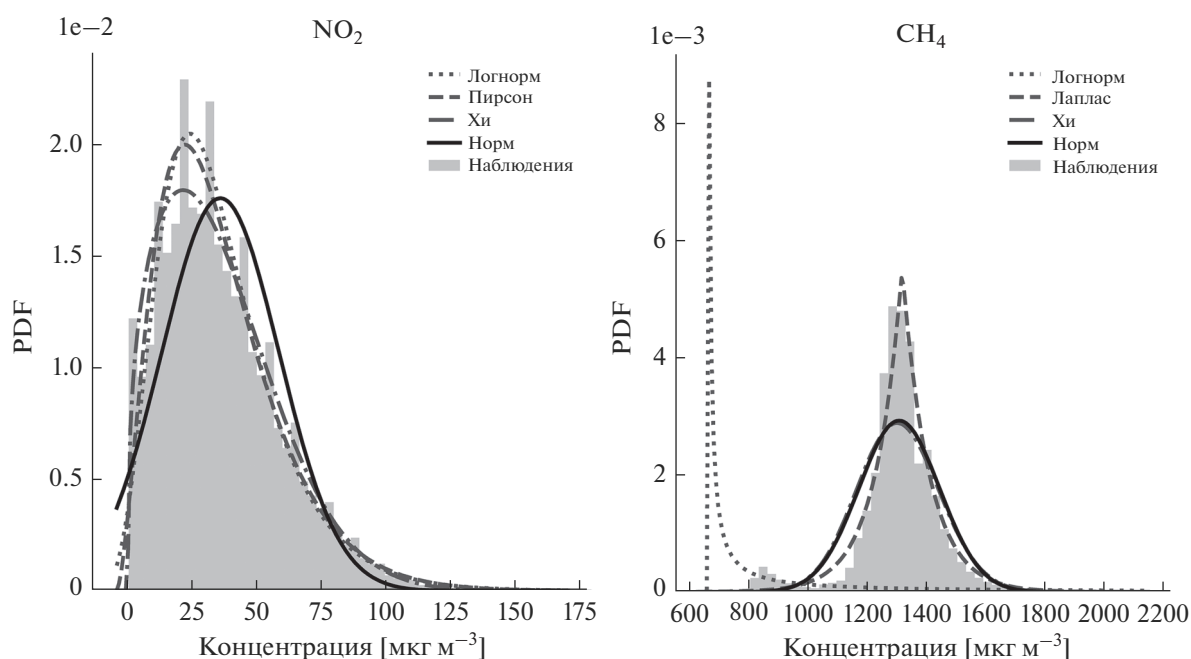


Рис. 2. Функции плотности вероятности (*PDF – probability density function*), данных наблюдений NO_2 и CH_4 на станциях сети МЭМ с 1 января по 31 декабря 2012 г.

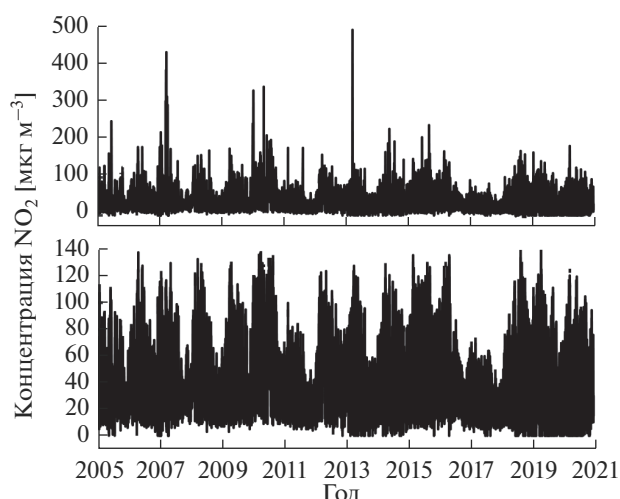


Рис. 3. Пример исходных (вверху) и отфильтрованных (внизу) данных наблюдений приземной концентрации NO_2 на сети станций Мосэкомониторинга с 2005 по 2020 гг.

мального распределения (рис. 2). Поэтому каждый ряд складывался в двумерную матрицу “А” размерностью $192 \times (72 \times 31)$. Здесь 192 – количество строк матрицы равно количеству месяцев за расчетный период 16 лет, 72 – количество 20-минутных измерений в день, 31 – максимальное количество дней в месяце (табл. 2). В пределах каждой строки и каждого столбца полученной матрицы “А” выборка приближалась к нормальному распределению и к ней можно применить стандартные статистические операторы. В матрице “А” присутствовали значения *NaN* (*not available numbers*), полученные после удаления нулевых и отрицательных значений и другие пропуски, связанные с отсутствием данных, например, когда станция не работала.

Таблица 2. Пример матрицы “А”, сложенной из ряда данных наблюдений приземной концентрации NO_2 [$\text{мкг} \cdot \text{м}^{-3}$] на станции Мосэкомониторинга с 2005 по 2020 гг.

Порядковый номер		Измерения в месяце							
		1	2	3	4	5	...	2231	2232
Месяца	1	26	26	25	23	21	...	14	17
	2	15	14	13	13	13	...	<i>NaN</i>	<i>NaN</i>
	3	26	27	27	30	32	...	54	56
	4	60	60	61	62	60	...	<i>NaN</i>	<i>NaN</i>
	5	31	34	<i>NaN</i>	33	40	...	57	55

	190	32	27	25	30	36	...	28	27
	191	25	24	22	22	21	...	<i>NaN</i>	<i>NaN</i>
	192	14	12	12	13	13	...	20	18

Далее запускался цикл по строкам матрицы “А”, и из каждой строки убирался линейный тренд, после чего в ней считалось стандартное отклонение *STD*. В полученной выборке запоминались координаты тех ячеек, в которых значение выходило за пределы четырех *STD*. По запомненным координатам значения концентрации в ячейках матрицы “А” заменялись на *NaN*, т.е. удалялись. После завершения цикла по строкам матрицы “А” запускался цикл по ее столбцам, и в них проделывались все те же операции. Чередование циклов по столбцам и строкам матрицы “А” проходило итерациями до тех пор, пока количество *NaN* в ней не становилось постоянным, т.е. пока не удалятся все выбросы.

После фильтрации матрица “А” обратно складывалась в отфильтрованный ряд. В качестве примера на рис. 3 показаны данные измерений NO_2 на станции Марьино до и после фильтрации.

3. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

Данные сети МЭМ использованы при построении зависимости средней концентрации от расстояния до центра города (рис. 4). В среднем полученное распределение примесей по территории мегаполиса показывает значительное уменьшение CO и небольшое уменьшение NO_x в направлении от центра к окраине города. У других примесей значимый пространственный градиент не наблюдается. Распределение концентрации загрязняющих примесей по территории мегаполиса неравномерное и связано с расположением их источников. Характерные особенности распределения не изменились по сравнению с теми, которые подробно были описаны в работе [18], выполненной с использованием данных наблюдений, проведенных до 2014 г., на меньшем числе станций. Поэтому приведем здесь основные выводы. Наиболее

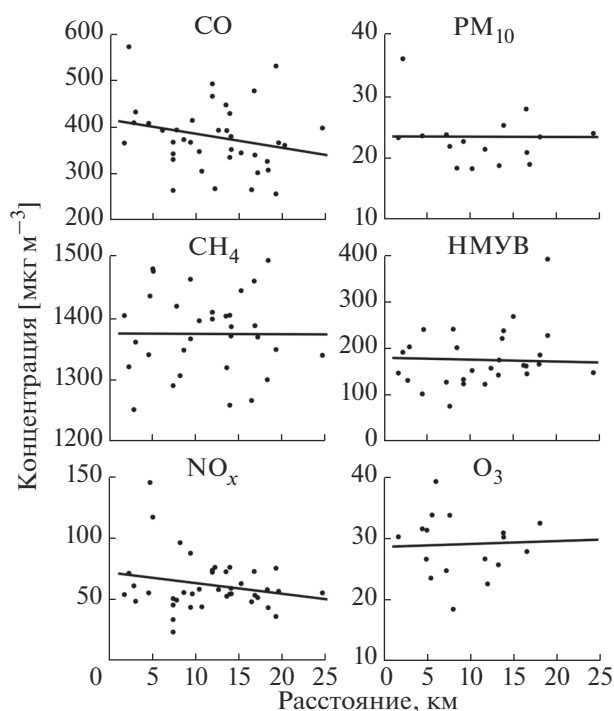


Рис. 4. Средние по всем станциям за период наблюдений 2005–2020 гг. концентрации примесей в зависимости от расстояния от центра Москвы.

загрязненным является Юго-восточный административный округ (ЮВАО), где расположены Московский нефтеперерабатывающий завод (МНПЗ), городские поля аэрации, четыре крупных ТЭЦ и другие “грязные” объекты. Сюда же с преобладающими западными и северо-западными ветрами поступают загрязняющие примеси из западных округов (СЗАО и ЮЗАО) и центрального округа (ЦАО). Наиболее высокая плотность дорог и, соответственно, наиболее интенсивное автомобильное движение в ЦАО. Именно здесь отмечается наиболее высокая концентрация CO, поскольку автотранспорт является его основным источником. Содержание PM₁₀ тоже зависит от автотранспорта, но отсутствие значительных различий в концентрации между центром и окраиной связано с ограничением движения в пределах МКАД тяжелых грузовиков, которые служат основным источником PM₁₀. Самым чистым является Северо-Восточный округ, большую часть территории которого занимают Национальный парк “Лосиный остров” и парк “Сокольники”.

Максимальные значения концентрации CH₄ зафиксированы в жилых районах Москвы на расстоянии от 8 до 18 км от центра. Именно старомосковские газифицированные в 50–70-е годы жилые кварталы являются основным источником метана. Концентрация O₃ сильно варьирует от места к месту из-за сильного влияния на нее микроме-

теорологических процессов и сухого осаждения на поверхности. Нисходящие воздушные потоки, которые формируются при обтекании зданий, вблизи которых располагается станция, могут значительно повышать концентрацию O₃. Высокие концентрации НМУВ наблюдаются на станциях, расположенных вблизи Третьего транспортного кольца (ТТК) радиусом около 5 км и МКАД радиусом от 13 до 18 км, где расположено большинство теплоэлектроцентралей, Московский нефтеперерабатывающий завод (МНПЗ), Гурьяновские и Люберецкие поля аэрации и очистные сооружения. Влияние других промышленных объектов и городской инфраструктуры будет обсуждаться при анализе временной изменчивости содержания примесей в воздушном бассейне Москвы.

4. СУТОЧНЫЙ ХОД

Суточные вариации приземных концентраций CO, NO, NO₂, O₃, CH₄, НМУВ и PM₁₀, усредненных по всем станциям за период 2005–2020 гг., показаны на рис. 5. В течение ночи с понедельника по пятницу концентрации CO, NO, NO₂, НМУВ и PM₁₀ снижаются и достигают минимума в 04 ч., для NO – 03 ч. по московскому времени. Основной причиной ночного снижения уровня загрязнения в Москве является проветривание города на фоне малых ночных выбросов загрязняющих веществ. В концентрации O₃ приток чистого воздуха проявляется в ее увеличении, но после 04 ч. начинают преобладать процессы химического разрушения и сухого осаждения озона на земной поверхности, что приводит к образованию утреннего минимума озона. Утренний рост концентрации NO начинается в 04–05 ч., что на час раньше, чем у NO₂, во-первых, из-за увеличения антропогенных выбросов NO_x, в составе которых около 90% NO и только 10% NO₂, во-вторых, из-за слабого стока NO в реакции с O₃ в это время суток, связанного с его низкой концентрацией и, в-третьих, из-за быстрой фотодиссоциации накопленных ночью NO₂ и N₂O₅ и образования NO в начале светового дня. Около 05 ч. начинается быстрый рост всех других примесей и общего уровня загрязнения ПСА, который продолжается до 08–09 ч., когда достигается утренний максимум. Раннее начало и быстрый рост увеличения концентрации большинства примесей вызваны не только активизацией городских источников в это время, но и их накоплением под приземной температурной инверсией, которая на территории мегаполиса обычно разрушается в 06–07 ч. в летнее время и в 08–09 ч. зимой [22, 23]. Такой сезонный ход температурной стратификации, возможно, ответственен и за формирование бимодальной структуры утреннего максимума CO (08 ч. и 11 ч.) хорошо заметный в отдельные се-

зоны, но слабо проявляющийся из-за сдвига по времени в средних годовых значениях.

Характерное для суточного хода всех примесей послеполуденное снижение концентрации вызвано разрушением инверсии и вертикальным перемешиванием в ПСА. Высокая активность автотранспорта в вечерний час пик, совпадающая по времени с повышением устойчивости ПСА,

приводит к росту уровня загрязнения после дневного минимума 14–15 ч., для NO – после 18 ч. Вечерний максимум концентрации загрязняющих веществ приходится на 22 ч., для NO – 23 ч. Если у NO утренний максимум превалирует над вечерним, то у NO₂ вечерний максимум существенно больше утреннего. Взаимодействие NO, NO₂, НМУВ и O₃ формирует их состояние близкое к

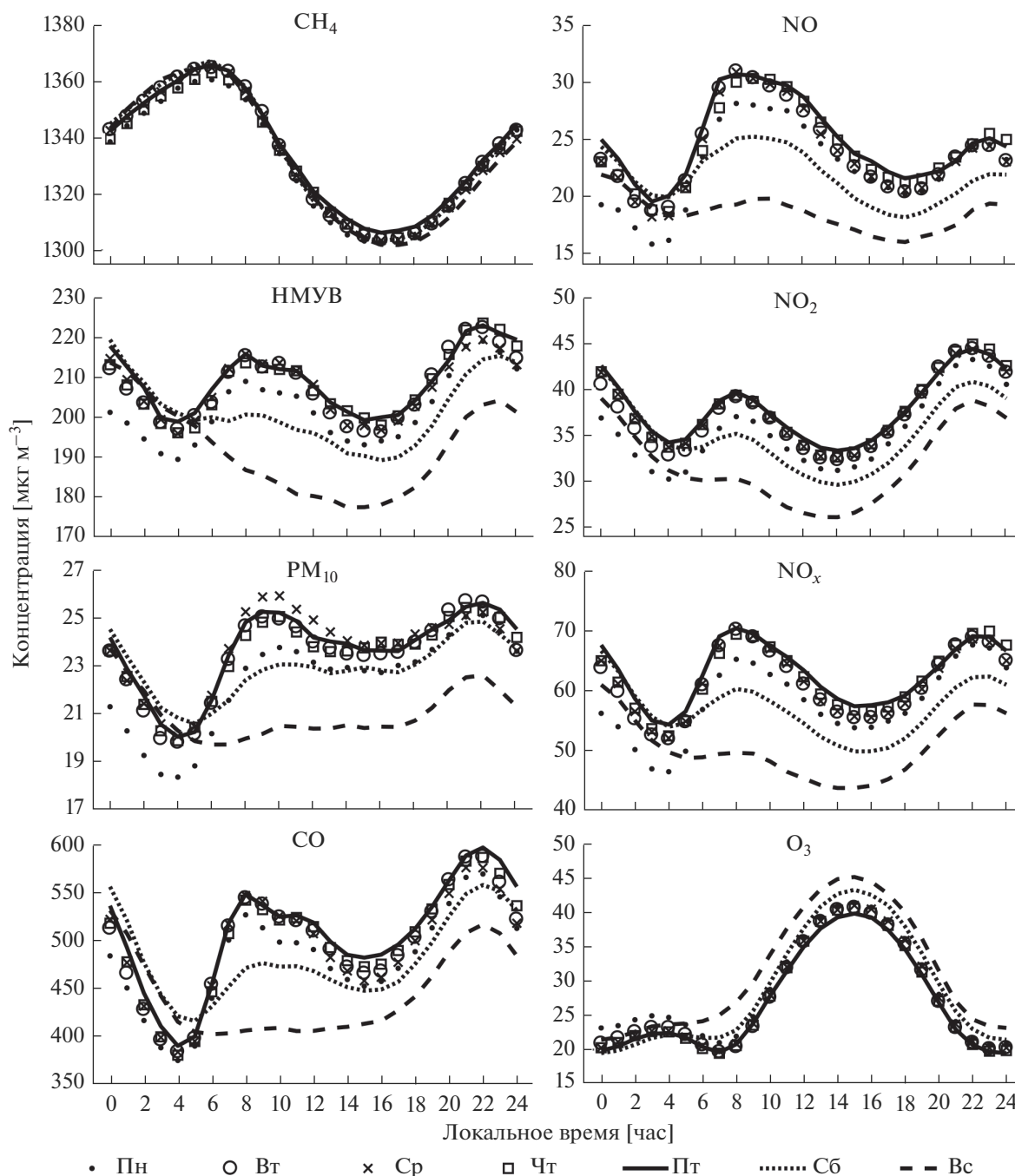
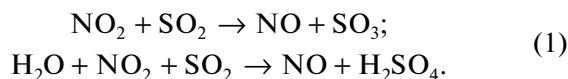


Рис. 5. Суточный ход концентрации загрязняющих примесей для каждого дня недели, осредненный за период измерений 2005–2020 гг. и по всем станциям Мосэкомониторинга.

фотохимическому равновесию и определяет особенности их суточного хода. Нарушение фотохимического равновесия, в частности, проявляющееся в смещении по времени вечернего максимума концентрации NO относительно NO₂, происходит в результате образования NO в реакциях NO₂ с SO₂ [13]:



Суточная изменчивость CO – химически менее активной примеси, чем окислы азота – в значительной степени зависит от накопления в подинверсионном слое, что проявляется в виде резкого вечернего максимума. Суточные вариации O₃ (рис. 5) характерны для большинства крупных городов. В будние дни его минимальная концентрация наблюдается в 07 ч. и 23 ч., а максимальная – в 15 ч. В воскресенье утренний минимум O₃ отсутствует, так как в это время движение автотранспорта значительно менее интенсивное, чем в будни и его химический сток в реакции с NO ослаблен [24].

Антропогенные источники метана – утечки из системы городского газоснабжения, жилищного сектора, канализационных и очистных систем и т.д. – слабо зависят от времени суток и дня недели. Суточный ход CH₄ определяется продолжительностью светового дня, температурой, погодными условиями, и изменчивостью вертикальной стратификации ПСА. Суточные вариации CH₄ могут использоваться в качестве индикатора влияния инверсий на уровень загрязнения в мегаполисе. В работе [25] предложен метод оценки эмиссий CH₄ и других веществ от природных и антропогенных источников по скорости накопления метана в подинверсионном слое. Если из всех рядов данных наблюдений примесей извлечь метановую 24-часовую гармонику, то можно получить суточные вариации интенсивности городских источников загрязняющих примесей и активности фотохимических процессов.

С вечера пятницы и в течение всей последующей ночи концентрации CO, NO, NO₂ и НМУВ превышают их значения для этого времени суток в другие дни недели. Ночная жизнь города в конце рабочей недели, таким образом, является наиболее активной. Но с раннего утра субботы концентрации этих примесей, а также РМ₁₀ становятся значительно ниже по сравнению с буднями. В воскресном суточном цикле CO и НМУВ исчезает характерный утренний максимум, а для NO₂ и РМ₁₀ этот максимум становится малозаметным.

5. НЕДЕЛЬНЫЙ ЦИКЛ

Недельные вариации показывают зависимость концентрации примесей от активности их источников, оказывающих воздействие на состав атмосферы Московского мегаполиса в течение недели. Для получения недельного цикла использовались дневные значения концентрации, усредненные в интервале 07:20–00:00, и средние ночные значения в интервале 00:20–7:00 по московскому времени. В работе [13] недельные вариации для периода 2005–2014 гг. получены анализом Фурье, за которым последовал синтез колебаний с периодами более 8 дней методом обратных Фурье преобразований. Но для применения Фурье анализа было необходимо восстанавливать все пропуски в рядах данных наблюдений каждой примеси, на каждой станции МЭМ. После синтеза колебаний пропуски в данных возвращались на свое место и рассчитывались недельные циклы для каждой станции и в среднем по городу для каждого сезона года методом наложенных эпох (МНЭ). В настоящей работе сразу применен классический метод наложенных эпох, реперными точками в котором послужили все воскресенья временных рядов. В результате анализа для каждой примеси получена средняя за 16 лет с 2005 по 2020 г. неделя вариаций средних по Москве концентраций отдельно для дневного и ночного времени суток (рис. 6).

Недельный цикл демонстрирует так называемый “эффект выходного дня” (SE) – понижение уровня загрязнения городского воздуха в субботу-воскресенье. Относительные изменения концентраций примесей в течение средней недели δ рассчитывались по формуле:

$$\delta = \frac{D - WD}{WD} \times 100 \%, \quad (2)$$

где D – значение концентрации примеси для каждого дня средней недели (Day); WD – среднее значение концентрации со вторника по пятницу включительно (WorkDays). SE отчетливо проявляется в недельных циклах, рассчитанных по всему объему данных (рис. 6). Концентрации примесей в будни со вторника по пятницу меняются незначительно. Максимальное снижение дневных концентраций CO, NO, NO₂, НМУВ и РМ₁₀ приходится на воскресенье. В субботу днем снижение концентраций составляет около 40–50%, а в понедельник 20–30% от дневных воскресных значений. Ночь с воскресенья на понедельник отличается самыми низкими ночными концентрациями, что объясняется наименьшей активностью автотранспорта и перерывом в работе многих промышленных предприятий.

Изменение концентрации O₃ в конце недели имеет противоположный знак. В субботу днем она больше, чем днем в будни, а в воскресенье достигает максимальных значений за неделю. В ночь на

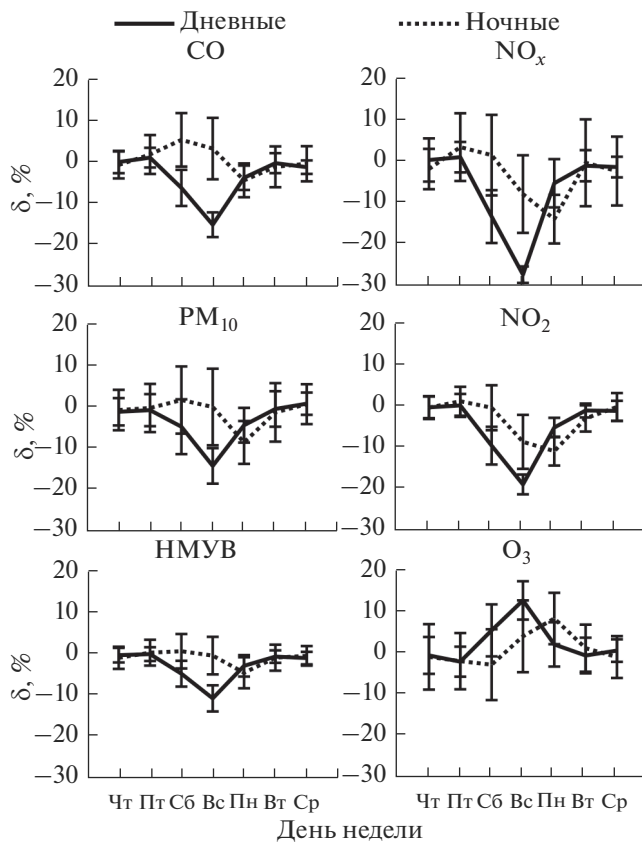


Рис. 6. Недельные циклы концентраций загрязняющих веществ (δ , %) для дневного (07:20–00:00) и ночного (00:20–7:00) времени суток, осредненные за период измерений 2005–2020 гг. и по всей территории города.

понедельник концентрация O_3 превышает ночные значения для других дней недели. В понедельник днем SE O_3 исчезает. Слабое уменьшение концентрации CH_4 в конце недели отмечается как днем, так и ночью, однако, это уменьшение не является значимым. Природный газ используют в качестве

Таблица 3. Изменение концентрации примесей в приземном слое атмосферы в воскресенье относительно будней (вторник–пятница), осредненное за период 2005–2020 гг. и по всем городским станциям

Примесь	SE, %	
	07:20–0:00	00:20–7:00
CH_4	-0.1 ± 0.3	-0.3 ± 0.4
НМУВ	-10.4 ± 3.2	-4.1 ± 3.8
PM_{10}	-13.9 ± 4.3	-8.2 ± 5.2
CO	-15.1 ± 3.0	-4.3 ± 4.1
NO	-27.2 ± 2.0	-13.7 ± 5.9
NO_2	-18.4 ± 2.4	-10.3 ± 3.5
O_3	13.6 ± 4.7	9.1 ± 6.3

топлива всего несколько процентов от общего парка автомобилей, поэтому временная цикличность графика незначительно влияет на недельные вариации метана. Мало зависят от дня недели также утечки CH_4 в системе городского газоснабжения и эмиссии от других источников, в том числе природных.

Относительные величины снижения концентрации загрязняющих веществ в воскресенье (SE), осредненные за весь период измерений с 2005 по 2020 г., представлены в табл. 3. Дневные (07:20–0:00) изменения показывают уменьшение концентраций в воскресенье относительно средних значений за вторник–пятницу, а ночные изменения – уменьшение концентраций в ночь с воскресенья на понедельник (00:20–7:00) относительно средних значений для того же времени суток в период со вторника по субботу.

Максимальный воскресный эффект SE наблюдается в NO. Дневные и ночные значения равны, соответственно, 27.2 и 13.7%. Минимальный SE – в НМУВ, соответственно, 10.4 и 4.1%. Дневные и ночные SE в NO_2 принимают промежуточные значения – 18.4 и 10.3%. В PM_{10} и CO днем SE примерно одинаковы 14–15%, а для ночных концентраций 4–8%. Концентрация озона, в отличие от других примесей, в воскресенье днем превышает ее значения в будни на 13.6%, а ночью на 9.1%. Средние за 16-летний период ночные значения SE являются значимыми только для NO, NO_2 , PM_{10} и O_3 .

6. СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ

Сезонные вариации содержания примесей в городском воздухе определяются погодными условиями и активностью их антропогенных источников. Существует некоторая связь между этими факторами. Заметное влияние на антропогенные эмиссии CO, НМУВ, NO_x и, в меньшей степени, других примесей оказывает с октября по апрель работа централизованной системы отопления. Практически все московские предприятия теплоэнергетики работают на природном газе. Но при очень низких температурах воздуха в зимний период может дополнительно сжигаться жидкое топливо, что приводит к резкому увеличению выбросов загрязняющих примесей. В жилом секторе в такие периоды также больше сжигается природного газа, что, в свою очередь, увеличивает выбросы CH_4 . Чаще всего жидкое топливо в теплоэнергетике применяют в феврале, когда температура воздуха в средней полосе европейской части России опускалась до предельно низких значений. В феврале также наблюдается высокая повторяемость устойчивой стратификации приземного слоя атмосферы, что дополнительно способствует накоплению примесей. Февральский максимум

сезонных концентраций ярко выделяется у НМУВ и CO, которые являются одними из основных продуктов горения мазута (рис. 7). Повышенное энергопотребление в феврале также сопровождалось выбросами аэрозоля PM₁₀ и NO_x. Низкие сезонные температуры влияют не только на работу предприятий теплоэнергетики, но также и на транспортную активность. В таких условиях требуется гораздо больше времени и топлива на прогрев двигателей внутреннего сгорания, при низких температурах в них не до конца сгорает топливо, что приводит к дополнительным выбросам НМУВ и CO – продуктами сгорания жидкого топлива (рис. 7).

Летний минимум уровня загрязнения в Москве в июне-июле вызван низкой экономической, деловой и социальной активностью в сезон отпусков и выездом москвичей за пределы города, а также вымыванием из ПСА некоторых примесей частыми в это время года дождями [23] и наибольшей высотой ПСА. В августе-сентябре формируется второй сезонный максимум загрязняющих примесей, который вызван повышенной активностью транспортного трафика после отпусков и в преддверие начала учебного года. Главный максимум сезонных концентраций взвешенных частиц PM₁₀ наблюдается в апреле–мае, когда в отсутствие травяного покрова ветер поднимает в воздух частицы почвы и накопленные за зиму на обочинах дорог песок, сухую листву и остатки противогололедного реаген-

та. Ситуацию усугубляет автотранспорт, который все еще использует зимние шипованные шины, что в разы увеличивает износ дорожного полотна и эмиссии аэрозоля в атмосферу, а также адвекция дымового аэрозоля от сжигания сухой травы и сельскохозяйственных отходов. Минимальный уровень PM₁₀ отмечается в зимний период, когда почва находится под слоем снега, а истирание холодного дорожного полотна и шин очень мало.

Сезонный ход O₃ в городской атмосфере является проявлением глобальной изменчивости его содержания в тропосфере северного полушария, характерными особенностями которого являются максимум весной и минимум осенью [26]. Влияние города проявляется в активизации процессов образования и разрушения озона в фотохимических реакциях с окислами азота и летучими органическими соединениями (ЛОС). Высокая УФ освещенность и большое количество ЛОС антропогенного и природного происхождения весной – летом способствуют более активному, чем вне города, образованию озона, а низкий уровень УФ радиации и малое содержание биогенных ЛОС осенью-зимой способствуют его разрушению. В результате происходит увеличение по сравнению с окружающей местностью летнего максимума озона и углублению зимнего минимума. Характерной для Москвы особенностью состояния фотохимической системы, является более высокая чувствительность скорости образования озона к

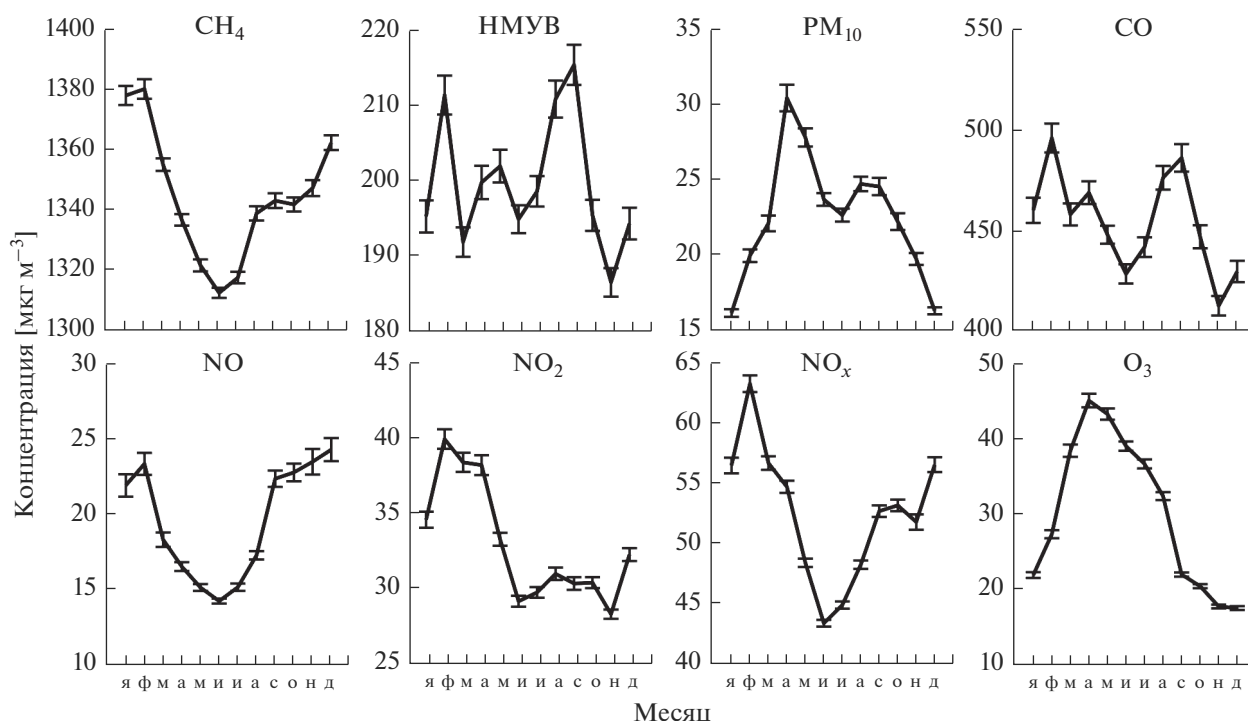


Рис. 7. Сезонные вариации среднемесячных концентраций загрязняющих примесей в среднем по городу и за период 2005–2020 гг.

изменениям ЛОС, чем к изменениям окислов азота [13] и, как следствие, отсутствие вторичного максимума O_3 в июле–августе, типичного для многих других крупных городов.

Концентрация NO – наибольшая в холодный сезон, что связано с интенсивным сжиганием топлива и высокой устойчивостью пограничного слоя атмосферы в это время года. Максимум NO_2 , образующегося в реакции NO с O_3 , совпадает с весенним максимумом озона, а спад в осенний период – с осенним минимумом озона.

Амплитуда сезонного хода метана CH_4 самая низкая по сравнению с другими примесями, поскольку из-за большого времени жизни он хорошо перемешан в атмосфере. Зимой при частых и продолжительных ночных температурных инверсиях и практически полном отсутствии конвекции метан накапливается в приземном слое атмосферы. Летний минимум концентрации метана дополнительно усиливается его окислением гидроксильным радикалом OH , содержание которого тем выше, чем больше концентрации озона и водяного пара. Влияние постоянно действующих городских источников мало влияет на сезонный ход метана.

7. ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ И ТРЕНДЫ

Среднегодовые значения приземных концентраций загрязняющих веществ, осредненные по всей территории Московского мегаполиса, представлены на рис. 8 и в табл. 4. В табл. 4 также приведены оценки линейного тренда и их значимость, рассчитанная как отношение стандартного отклонения к квадратному корню размера выборки. Поскольку соотношение NO и NO_2 в NO_x меняется со временем, то долговременные изменения концентрации и эмиссий NO_x представлены в массовых единицах азота [$мкг N \cdot м^{-3}$].

Содержание всех примесей кроме озона снижалось в течение 2005–2020 гг. При этом выделяются первые 2–3 года, когда их концентрации были экстремально высокими. Концентрация озона, наоборот, в это время была экстремально низкой. Этому нетрудно дать объяснение, если вернуться ко времени становления сети станций МЭМ. Размещение в Москве автоматических станций с непрерывным режимом работы рассматривалось как расширение возможностей действовавшей в то время системы мониторинга загрязнения атмосферного воздуха Росгидромета, ориентированной на измерения четыре раза в сутки CO , SO_2 , NO_2 и аэрозолей. В 90-е годы функционирование этой системы испытывало серьезные проблемы, что заметно сказалось на качестве и количестве получаемых данных [27]. Первоочередная задача установки автоматизированных станций МЭМ

состояла в своевременном выявлении источников загрязнения, способных вызвать образование экстремальных экологических ситуаций. Поэтому они размещались в местах, где аномально высокие концентрации загрязняющих веществ отмечались наиболее часто, что в результате привело к переоценке среднего уровня загрязнения городской атмосферы. Со временем число станций росло, совершенствовались средства и методики измерений. К 2007–2008 гг. сложилась эффективно действующая современная система мониторинга качества воздуха, охватывающая всю территорию Москвы и ее окрестности. С этого времени значения трендов содержания примесей могут считаться характерными для города в целом.

Снижение концентрации CO , NO_x , НМУВ и PM_{10} в Москве в период наблюдений в первую очередь связано с ликвидацией или удалением из Москвы крупных промышленных предприятий, модернизацией и переводом на газ предприятий теплоэнергетики и совершенствованием транспортной структуры. При общем увеличении количества автомобилей уменьшение транспортных выбросов происходило благодаря переходу на новые модели с высокотемпературным сжиганием топлива, ограничению въезда грузового и транзитного транспорта на территорию города, использованию более экологических видов топлива, модернизации дорожной сети и заправочных станций, развитию сети общественного транспорта [<https://mosecom.mos.ru/>; 18].

Скорость снижения содержания в воздухе CO , зависящего в основном от автомобильного транспорта, равна $-4.0\% \cdot год^{-1}$ (табл. 4). Заметно меньше скорость снижения у NO_x равная $-2.6\% \cdot год^{-1}$, поскольку их значительная часть связана со сжиганием природного газа в ТЭЦ и жилом секторе, величина которой изменялась не столь быстро, как транспортные выбросы. Наибольший спад испытала концентрация неметановых углеводородов $-4.3\% \cdot год^{-1}$, которые имеют те же антропогенные источники, что и CO и NO_x , но заметный вклад в их содержание вносят биогенные источники [28, 29]. В последние годы активно проводился ремонт и модернизация инженерных сооружений, связанных с очисткой сточных вод, вместе с тем из-за интенсивной застройки территории города уменьшилась площадь зеленых насаждений, вследствие чего снизились биогенные эмиссии НМУВ.

Эпизодически принимаемые меры по совершенствованию структуры городского транспорта, оптимизации дорожного движения, вкуче с интенсивным дорожным строительством привели к большим изменениям от года к году PM_{10} . Но в целом аэрозольное загрязнение городской атмосферы все еще остается основным фактором, негативно влияющим на качество воздуха в Московском мега-

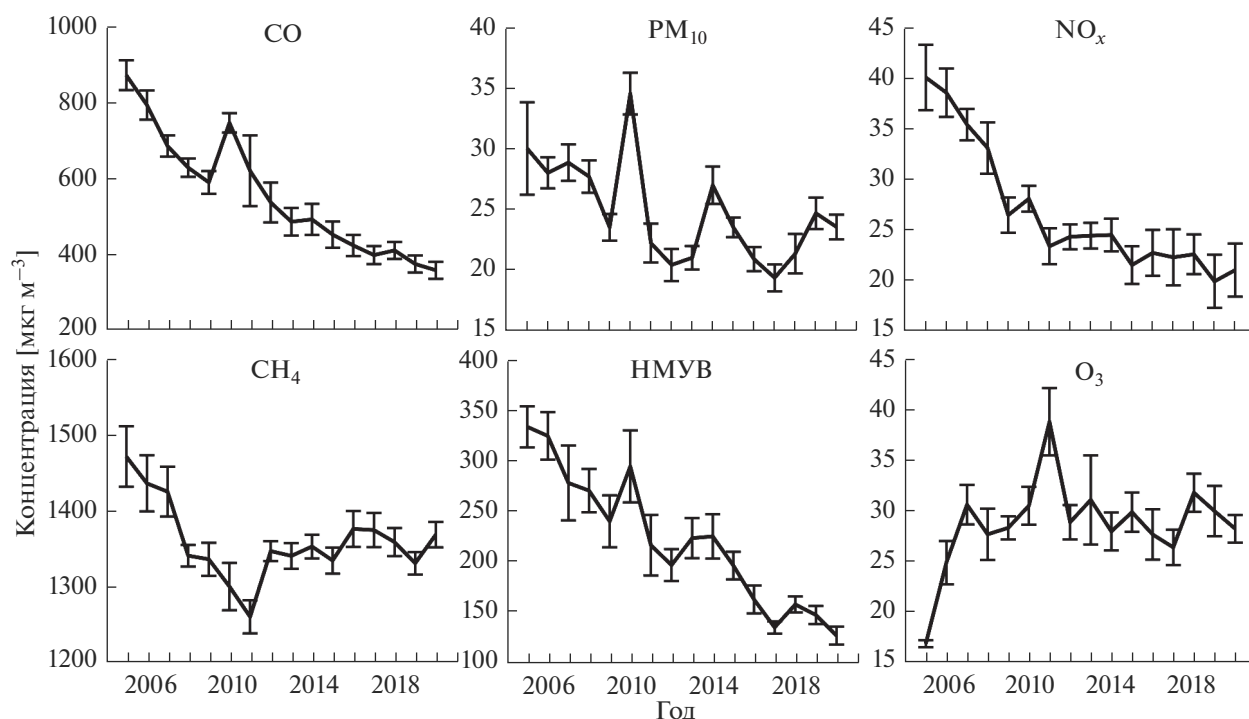


Рис. 8. Межгодовые вариации средних по Москве концентраций загрязняющих примесей. Значения NO_x приведены в массовой концентрации азота [мкг N · м⁻³].

полисе. Скорость снижения PM₁₀ составила всего $-1.7\% \cdot \text{год}^{-1}$. Отсутствует значимый тренд содержания в городском воздухе озона. Небольшое увеличение CH₄ и уменьшение CO, PM₁₀, НМУВ в 2020 г., очевидно, вызвано снижением деловой и транспортной активности в период карантина из-за эпидемии коронавируса.

Межгодовые вариации среднегодовых концентраций загрязняющих примесей в значительной степени вызваны погодными изменениями. Наиболее отчетливо влияние изменений солнечной инсоляции и высоких температур заметно в изменениях концентрации озона. Рекордной продолжительности блокирующий антициклон, аномально высокие температуры, горение лесов и торфяников в ближайших окрестностях Москвы в июле–августе 2010 г. вызвали рекордный рост концентрации большинства загрязняющих примесей, что отразилось в их средних годовых значениях. Подробно эта ситуация описана в целом ряде статей (см., например, [30, 31]).

Значительные вариации от года к году наблюдаются у концентрации метана, имеющего как антропогенные, так и биогенные источники. Экстремально высокие концентрации CH₄ в 2005–2008 гг. были зарегистрированы на 8 станциях МЭМ, размещенных в самых проблемных участках Москвы (в том числе рядом с крупным мусорным полигоном Саларьево на юго-западе

от Москвы) и оборудованных приборами с невысокой чувствительностью к CH₄. В 2009–2012 гг. число станций измерения CH₄ выросло до 14, были установлены новые приборы с более низким порогом чувствительности, что разбавило данные наблюдений значениями, близкими к фоновым. В 2008 г. был закрыт полигон Саларьево, а в 2009 г. полигон полностью законсервировали гидроизоляционными материалами и грунтом. В 2010 г. в Москве началась модернизация газораспределительных пунктов и закрыт на реконструкцию Московский нефтеперерабатывающий завод (МНПЗ). Эти события совпали с последствиями засухи и торфяными пожарами в окрестностях Москвы в 2010 г. и привели к понижению концентрации метана в 2010–2011 гг. Небольшое увеличение CH₄ с 2012 по 2020 г., является следствием быстрого роста населения Московского мегаполиса, строительства и газификации новых жилых массивов. Отсутствие значительных межгодовых вариаций в этот период связано с большим числом станций (не менее 24), ведущих измерения CH₄.

8. ОЦЕНКА ЭМИССИЙ

Наблюдения на сети МЭМ 2005–2020 гг. позволяют рассчитать среднегодовые антропогенные эмиссии CO, NO_x, НМУВ, CH₄ и PM₁₀ и их изменения за 16-летний период. Для расчетов использовался метод, описанный в [12, 18], основанный на

Таблица 4. Среднегодовые значения средних по всем станциям приземных концентраций загрязняющих веществ [$\text{мкг} \cdot \text{м}^{-3}$], а также их тренды [$\% \cdot \text{год}^{-1}$], рассчитанные для периода 2007–2020 гг. Значения NO_x представлены в единицах массовой концентрации азота [$\text{мкг N} \cdot \text{м}^{-3}$]

Год	CO	NO_x	CH_4	PM_{10}	НМУВ	O_3
2005	870 ± 39	39.9 ± 3.2	1471 ± 40	30.0 ± 3.8	334 ± 20	16.7 ± 0.3
2006	792 ± 39	38.4 ± 2.4	1436 ± 37	28.0 ± 1.3	325 ± 23	24.8 ± 2.1
2007	683 ± 28	35.2 ± 1.6	1425 ± 33	28.8 ± 1.5	279 ± 37	30.5 ± 2.0
2008	626 ± 24	32.9 ± 2.5	1340 ± 14	27.7 ± 1.3	271 ± 21	27.6 ± 2.5
2009	587 ± 30	26.3 ± 1.7	1336 ± 22	23.5 ± 1.1	241 ± 26	28.2 ± 1.2
2010	745 ± 26	27.9 ± 1.3	1300 ± 31	34.5 ± 1.7	295 ± 36	30.4 ± 1.9
2011	618 ± 93	23.2 ± 1.8	1260 ± 22	22.2 ± 1.6	217 ± 30	38.8 ± 3.3
2012	534 ± 53	24.1 ± 1.2	1346 ± 13	20.4 ± 1.3	197 ± 16	28.8 ± 1.7
2013	483 ± 37	24.2 ± 1.3	1340 ± 17	21.0 ± 1.0	224 ± 20	31.0 ± 4.4
2014	489 ± 41	24.3 ± 1.6	1353 ± 16	27.0 ± 1.5	226 ± 22	27.9 ± 1.9
2015	449 ± 34	21.3 ± 1.9	1334 ± 17	23.5 ± 0.8	197 ± 14	29.8 ± 2.0
2016	421 ± 28	22.5 ± 2.3	1376 ± 24	20.9 ± 1.0	163 ± 14	27.6 ± 2.5
2017	395 ± 24	22.1 ± 2.8	1374 ± 23	19.3 ± 1.1	136 ± 6	26.3 ± 1.8
2018	408 ± 23	22.4 ± 2.0	1358 ± 19	21.3 ± 1.6	158 ± 8	31.7 ± 1.9
2019	372 ± 23	19.7 ± 2.6	1330 ± 15	24.7 ± 1.3	148 ± 9	29.9 ± 2.5
2020	355 ± 23	20.8 ± 2.6	1368 ± 17	23.5 ± 1.0	127 ± 9	28.2 ± 1.4
Тренд, $\% \cdot \text{год}^{-1}$	-4.0 ± 0.5	-2.6 ± 0.4	0.1 ± 0.2	-1.7 ± 0.9	-4.3 ± 0.5	-0.4 ± 0.7

применении боксовой модели [32]. Поток примеси с единицы площади в единицу времени F и суммарное количество примеси Q , которое поступает в воздушную массу, проходящую через территорию города за время τ , равны [18]:

$$F = \Delta C_i \frac{H}{\tau}; \quad Q = FS, \quad (3)$$

где S – площадь города, H – высота слоя перемешивания, ΔC_i – средняя концентрация примеси на территории города за вычетом регионального фоновых значения (городская добавка).

Верхняя граница слоя перемешивания определялась по вертикальным профилям температуры, измеряемым на Останкинской башне. Среднегодовые значения H колеблются от 230 до 260 м. Время нахождения воздушной массы над городом определялось в предположении, что его территория близка к круговой. Средние значения скорости ветра в слое перемешивания получены по данным содарных наблюдений на Метеообсерватории МГУ им. М. В. Ломоносова (метод наблюдений описан в [33]) и приземным данным метеорологических станций Москвы. Средняя по территории и за весь период наблюдений скорость ветра в слое перемешивания (0–245 м) равна $4.9 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Среднегодовые значения скорости ветра варьируют в пределах 10%. При таких скоростях ветра среднее время нахождения воздушной массы над территорией города, примерно равно 3.5 ч.

В качестве фоновых концентраций использовались данные наблюдений на 3-х станциях МЭМ, расположенных в чистых условиях на расстоянии 35, 40 и 53 км от центра города. Распределение примесей антропогенного происхождения в слое перемешивания не является однородным по высоте. Градиентные наблюдения на Останкинской телебашне и на Высотной метеорологической мачте (ВММ-310) в г. Обнинск (2003–2017 гг.) показали, что концентрация NO_x , CO и CH_4 в среднем с высотой снижается, причем около 30–40% спада приходится на нижний 25-метровый слой. Данные этих наблюдений использовались для пересчета приземных концентраций в средние их значения по слою перемешивания [18].

Для расчета ежегодных интегральных эмиссий Q принята во внимание временная изменчивость площади мегаполиса от 1950 в 2005 до 2300 км^2 в 2020 г. Полученные оценки эмиссий CO, NO_x , НМУВ, CH_4 и PM_{10} от Москвы в период 2005–2020 гг. приведены на рис. 9. Эмиссии NO_x приведены в единицах массы азота. В этом случае эмиссии NO_x не зависят от соотношения NO и NO_2 на выходе от источника. Однако многие авторы приводят эмиссии NO_x в предположении, что при сгорании топлива в атмосферу выбрасываются NO_x в соотношении: NO – 90%; NO_2 – 10%. В таком случае $1 \text{ г NO}_x = 2.26 \text{ г N}$.

Характер изменчивости среднегодовых городских эмиссий Q (рис. 9) в целом соответствует изме-

нениям концентраций, и определяется действием тех же факторов. Некоторые отличия вызваны влиянием метеорологических процессов, которые способствуют накоплению или удалению загрязняющих примесей из атмосферы, тем самым меняя их приземную концентрацию при одинаковой активности источников. Примером этого может служить сложившаяся ситуация летом 2010 г. В условиях блокинга резко увеличилась продолжительность приземных инверсий, что поспособствовало накоплению CO и НМУВ и увеличению их приземных концентраций [30]. При этом эмиссии CO и НМУВ были обычными для этого времени года, поскольку не менялась активность транспорта. В меньшей степени подобные различия проявляются в NO_x из-за их активного разрушения в условиях высоких температур и УФ освещенности. Другой причиной расхождений может быть изменение состава атмосферы под влиянием, например, природных пожаров. Так медленное распространение продуктов горения лесов и торфяников на территорию Москвы привело к резкому увеличению концентрации аэрозолей, при относительно небольшом изменении эмиссий.

Наибольшее снижение за период наблюдений испытали концентрации CO и НМУВ. Их основные источники связаны с автомобильным транспортом. Для CO – это прямые выбросы продуктов сжигания топлива, для НМУВ – кроме выбросов с выхлопными газами – это также испарение битума с дорожного полотна и горюче смазочных материалов на заправочных станциях, при их производстве на заводе МНПЗ и транспортировке. Быстрый рост числа автомобилей к 2007 г. существенно замедлился. Переход на новые экологически более чистые модели автомобилей и виды топлива компенсировали увеличение выбросов CO и НМУВ. Однако в период 2012–2015 гг. началась масштабная реконструкция московской дорожной сети, при этом регистрировались самые длинные дорожные заторы в мире. В результате были приняты строгие меры по ограничению проезда по Москве грузового и легкового автотранспорта. В 2018 г. началось использование электроавтобусов. Все эти процессы и определили последовательное снижение ключевых загрязняющих примесей.

Но, одновременно, модернизация дорожной сети, строительство новых магистралей, дорожных развязок и земляные работы при строительстве зданий различного назначения увеличивали эмиссии аэрозолей, что проявилось в небольшом положительном тренде PM_{10} после 2012 г. На выбросах в атмосферу NO_x и CH_4 строительный бум отразился незначительно. Расширение и газификация жилищного фонда компенсировалось модернизацией предприятий электротеплоэнергетики и инженерных коммуникаций. Введение ка-

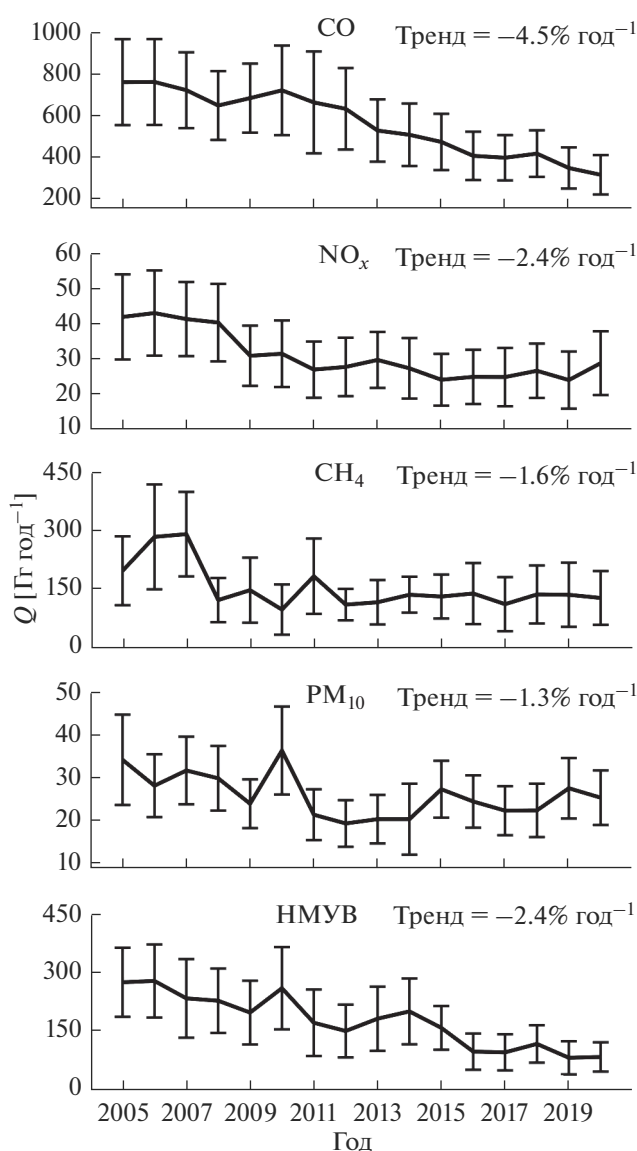


Рис. 9. Межгодовые вариации интегральной эмиссии загрязняющих веществ с территории мегаполиса. Эмиссии NO_x приведены к массе азота [$\text{Gt N} \cdot \text{год}^{-1}$]. Тренд рассчитан для периода 2007–2020 гг.

рантина в 2020 г. слабо сказалось на среднегодовых выбросах всех загрязняющих примесей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная обработка и фильтрация данных многолетних наблюдений на сети станций Мосэкомониторинга, построение и анализ функций распределения концентраций примесей для каждой станции позволили повысить качество данных и достоверность результатов их статистического анализа. Детальная структура суточной, недельной и сезонной цикличности, а также особенности распределения на территории Московского мегаполи-

са были выявлены и проанализированы для примесей, определяющих качество городского воздуха: NO, NO₂, CO, CH₄, НМУВ, O₃ и РМ₁₀. В суточном ходе всех, кроме озона, примесей экстремально высокие концентрации отмечаются в то время, когда утренняя и вечерняя активизация городского трафика происходит при наличии приземной или приподнятой температурной инверсии. Характерной особенностью недельного цикла является значительное уменьшение концентраций CO, NO_x, НМУВ и РМ₁₀ в воскресенье, меньшее в субботу и первой половине понедельника. Максимальные их ночные концентрации отмечаются в ночь на субботу, а минимальные — в ночь на понедельник. Недельные вариации озона находятся в противофазе, а концентрация CH₄ остается постоянной в течение недели. Подобная тесная связь между содержанием CO, NO_x, НМУВ и РМ₁₀ и активностью городских источников наблюдается и в сезонных вариациях.

Характерной особенностью состояния городской фотохимической системы является высокая чувствительность окислительной способности атмосферы к содержанию летучих органических соединений (химически активную их часть составляют НМУВ). В результате скорость образования озона и многих других токсичных соединений зависит, прежде всего, от содержания ЛОС антропогенного и природного происхождения, УФ солнечной освещенности, температуры воздуха и слабо зависит от содержания NO_x. Поэтому в отличие от многих других городов концентрация озона на протяжении многих лет в Москве оставалась практически неизменной, так как увеличение озона из-за снижения содержания NO_x компенсируется уменьшением скорости его образования при окислении ЛОС. Возможно, это свойство московской атмосферы ответственно за отсутствие заметного увеличения озона в 2020 г., когда антропогенное воздействие в период карантина заметно ослабло.

Авторы благодарны коллективу ГПБУ “Мосэкомониторинг” за передачу данных многолетних наблюдений состава атмосферы и многолетнее продуктивное сотрудничество. Обработка и анализ данных наблюдений концентрации примесей выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 21-17-00210). Методика расчетов величины недельного цикла разработана в ходе выполнения проекта РФФИ 18-29-10080, а проведение расчетов эмиссий — при поддержке проекта РФФИ 19-05-50088.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Crutzen P.J.* New Directions: The growing urban heat and pollution “island” effect — Impact on chemistry and climate // *Atmospheric Environment*. 2004. V. 38. P. 3539–3540. <https://doi.org/10.1016/J.Atmosenv.2004.03.032>
2. *Crutzen P.J.* Impacts of China’s air pollution. // *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2006. V. 4(7). P. 340–340.
3. *Gurjar B.R., Lelieveld J.* New directions: megacities and global change. // *Atmospheric Environment*. 2005. V. 39. P. 391–393. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.11.002>
4. *Butler T.M., Lawrence 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. P. 703–719. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.060>
5. *D’Angiola A., Dawidowski L., Gomez D.* Development of Spatially Disaggregated On-road Transport Emission Inventories for the Metropolitan Area of Buenos Aires // *IGAC Newsletter*. 2009. V. 40. P. 12–22.
6. *Molina M.J., Molina L.T.* Megacities and Atmospheric Pollution // *J. Air & Waste Management Association*. 2004. V. 54. P. 644–680. <https://doi.org/10.1080/10473289.2004.10470936>
7. *Molina M., Zaelke D., Sarma K., Andersen S., Ramathan 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. P. 20616–20621. <https://doi.org/10.1073/Pnas.0902568106>
8. *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. P. 39.
9. *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook* // *European Environment Agency, Denmark*. 2016. 28 p. ISBN 978-92-9213-806-6. <https://doi.org/10.2800/247535>
10. *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. P. 10963–10976. <https://doi.org/10.5194/acp-14-10963-2014>
11. *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. P. 3766–3771. <https://doi.org/10.1002/grl.50704>
12. *Elansky N.F.* Air quality and CO emissions in the Moscow megacity // *Urban Clim.* 2014. V. 8. P. 42–56. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.01.007>
13. *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. P. 117303. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117303>
14. Доклад “О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2019 году” / Под ред. А.О. Кульбачевского. Москва, 2020. 222 с.
15. *GAWWMO.* Impacts of megacities on air pollution and climate // *Rep.* № 205, 2012. ISBN 978-0-9882867-0-2. P. 298
16. *Gorchakov G.I., Sviridenkov M.A., Semoutnikova E.G., Chubarova N.Y., Holben B.N., Smirnov A.V., Emilenko A.S.,*

- Isakov A.A., Kopeikin V.M., Karpov A.V., Lezina O.S., Zadorozhnaya E.A.* Optical and microphysical parameters of the aerosol in the smoky atmosphere of the Moscow region in 2010. // *Dokl. Earch Sci.* 2011. V. 437. P. 513–517.
https://doi.org/10.1134/S1028334X11040131
17. *Kuznetsova I.N.* The effect of meteorology on air pollution in Moscow during the summer episodes of 2010 // *Izvestiya Atmos. Ocean. Phys.* 2012. V. 48(5). P. 504–515.
https://doi.org/10.1134/S0001433812050052
18. *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. P. 54–64.
https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.11.057
19. *Gorchakov G.I., Anoshin B.A., Semutnikova E.G.* Statistical analysis of mass concentration variations of the coarse aerosol in Moscow. // *Atmospheric and oceanic optics.* 2007. V. 20. № 06. P. 461–464
20. *Шальгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Д.В. Борисов, Е.А. Лезина* Эффективность коррекции эмиссий для расчетов химической транспортной модели CHIMERE в Московском регионе // *Оптика атмосферы и океана.* 2020. Т. 33. С. 441–447
21. *Golitsyn G.S., Grechko E.I., Wang G., Wang P., Dzhola A.V., Emilenko A.S., Kopeikin V.M., Rakitin V.S., Safronov A.N., Fokeeva E.V.* Studying the pollution of Moscow and Beijing atmospheres with carbon monoxide and aerosol. // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2015. V. 51. P. 1–11.
https://doi.org/10.1134/S0001433815010041
22. *Pankratova N.V., Elansky N.F., Belikov I.B., Lavrova O.V., Skorokhod A.I., Shumsky R.A.* Ozone and nitric oxides in the surface air over Northern Eurasia according to observational data obtained in TROICA experiments. // *Izvestiya Atmos. Ocean. Phys.* 2011. V. 47. P. 313–328.
https://doi.org/10.1134/S0001433811-030108
23. *Локощенко М.А., Богданович А.Ю., Еланский Н.Ф., Лезина Е.А.* Температурные инверсии в Москве и их влияние на состав приземного воздуха. // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана,* 2021. Т. 57. № 6. С. 1–10
24. *Elansky N.F., Lavrova O.V., Skorokhod A.I., Belikov I.B.* Trace gases in the atmosphere over Russian cities // *Atmos. Environ.* 2016. V. 143. P. 108–119.
https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.046
25. *Berezina E., Moiseenko K., Skorokhod A., Elansky N., Belikov I., Pankratova N.* Isoprene and monoterpenes over Russia and their impacts in tropospheric ozone formation // *Geography, Environment, Sustainability.* 2019. V. 12. P. 63–74.
https://doi.org/10.24057/2071-9388-2017-24
26. *Crutzen P. Zimmerman P.* The changing photochemistry of the troposphere // *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology.* 1991. V. 43. P. 136–151.
https://doi.org/10.3402/tellusb.v43i4.15403
27. *Безуглая Э.Ю., Смирнова И.В.* Воздух городов и его изменения // СПб.: Астерион, 2008. 254 с.
28. *Seinfeld J.H., Pandis S.N.* Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change // Hoboken, 2006. 1152 p. ISBN: 978-1-118-94740-1. N.J.: J. Wiley
29. *Sokhi R.S., Baklanov A., Schlünzen K.H.* Mesoscale Modelling for Meteorological and Air Pollution Applications // Anthem Press, 2018. 380 p.
30. *Elansky N.F., Mokhov I.I., Belikov I.B., Berezina E.V., Elokhov A.S., Ivanov V.A., Pankratova N.V., Postylyakov O.V., Safronov A.N., Skorokhod A.I., Shumskii R.A.* Gaseous admixtures in the atmosphere over Moscow during the 2010 summer. // *Izvestiya Atmos. Ocean. Phys.* 2011. V. 47. P. 672–681.
https://doi.org/10.1134/S000143381106003X
31. *Gorchakov G.I., Semoutnikova E.G., Isakov A.A., Kopeikin V.M., Karpov A.V., Kurbatov G.A., Lezina E.A., Ponomareva T.Ya., Sokolov A.V.* Moscow smoky haze of 2010. Extreme aerosol and gaseous air pollution in Moscow region. // *Atmos. Ocean. Optic.* 2010. V. 24. P. 452–458
32. *Brasseur G.P., Jacob D.J.* Modeling of Atmospheric Chemistry // Cambridge Univ. Press. 2017. 574 p. ISBN-13: 978-1107146969.
https://doi.org/10.1017/97813
33. *Lokoshchenko M.A.* Wind regime in the lower atmosphere over Moscow from the long-term acoustic sounding data // *Meteorol. Hydrol.* 2014. V. 39. P. 218–227.
https://doi.org/10.3103/S1068373914040025

Spatio-Temporal Variations in Pollution of the Moscow Air Basin and Pollutant Emissions

N. F. Elansky¹, A. V. Shilkin^{1, 2, *}, N. A. Ponomarev^{1, 3}, P. V. Zakharova⁴,
M. D. Kachko⁵, and T. I. Poliakov⁵

¹ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky Pereulok, 3, Moscow, 119017 Russia

² Research and Production Association “Typhoon”, Pobedy St., 4, Obninsk, 249031 Russia

³ Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1–2, Moscow, 119234 Russia

⁴ Budgetary Environmental Protection Institution “MosEcoMonitoring”, Novyi Arbat, 11, Moscow, 119019 Russia

⁵ Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Miusskaya square, 9, Moscow, 125047 Russia

*e-mail: shilkin@rpatyphoon.ru

The location of the Moscow megacity on a plain at a higher latitude compared to other metropolitan areas creates special conditions for the chemical transformation of pollutants in the urban atmosphere, their transfer, and accumulation. The authors processed and analyzed the observational data of NO, NO₂, CO, CH₄, O₃, non-methane hydrocarbons (NMHC) and aerosols (PM10) surface concentrations obtained at the State Budgetary Institution “Mosecomonitoring” station network for the period from 2005 to 2020. Temporal and

spatial parameters were calculated characterizing the dynamics of the Moscow air basin pollution. A decrease in the concentrations of most pollutants is explained by the renewal of the vehicle fleet, the introduction of restrictions on the entry of freight transport into the city, as well as the modernization of industrial enterprises, treatment facilities and the gas supply system. Significant negative trends were obtained for NMHC, CO, NO_x and PM₁₀, respectively, 4.3, 4.0, 2.6 and 1.7% · yr⁻¹. An insignificant negative trend was obtained for O₃ as well as no significant changes in CH₄ annual mean concentrations. For pollutants that determine air quality total emissions from urban sources have been calculated. Their values also show negative trends. Over a long period, the ozone surface concentrations in Moscow remained almost unchanged, which indicates a weak sensitivity of the atmosphere oxidizing properties and the rate of ozone formation to the changes in surface concentrations of nitrogen radicals as well as their high sensitivity to volatile organic compounds.

Keywords: megacity atmosphere, atmospheric composition, air quality, emissions, pollutants, surface concentrations, diurnal and seasonal variations, weekly cycle