

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.510.42, 551.510.411, 519.25

Недельный цикл содержания загрязняющих примесей в приземном воздухе г. Москвы

Н.Ф. Еланский¹, А.В. Шилкин², Е.Г. Семутникова³, П.В. Захарова⁴,
В.С. Ракитин¹, Н.А. Пономарев¹, Я.М. Веревкин^{1*}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

²НПО «Тайфун»
249038, Калужская область, г. Обнинск, ул. Победы, 4

³Департамент природопользования и охраны окружающей среды города Москвы
119019, г. Москва, ул. Новый Арбат, 11, стр. 1

⁴ГПБУ «Мосэкомониторинг»
119019, г. Москва, ул. Новый Арбат, 11, стр. 1

Поступила в редакцию 11.07.2018 г.

Временная изменчивость концентраций газовых примесей CO, NO, NO₂, SO₂ и аэрозоля PM₁₀ в приземном слое атмосферы над Москвой имеет недельную цикличность, которая проявляется в снижении уровня загрязнения в выходные дни. Для определения характера недельных вариаций и амплитуды недельного цикла впервые использован 10-летний архив данных наблюдений состава атмосферы на 46 станциях ГПБУ «Мосэкомониторинг». Средние по территории города и сезонам амплитуды недельных колебаний дневной концентрации CO меняются от 21,8% весной до 29,2% зимой, а NO — от 16,9% летом до 38,1% зимой. Недельный цикл дневной концентрации NO₂ стабилен в течение года и его амплитуда в среднем равна 33%. Амплитуды недельных вариаций SO₂ и PM₁₀ максимальны осенью по дневным данным и равны соответственно 22,7 и 35,2%, а недельный цикл CH₄ не является значимым. В ночных концентрациях этих примесей значимый недельный цикл выделяется только в значениях NO₂. Анализ данных, полученных по отдельным округам Москвы, показывает примерно одинаковое проявление воскресного эффекта. Лишь в концентрации CO повышенными амплитудами выделяются центр города (39,2%) и юго-западный сектор (35,1%).

Ключевые слова: недельный цикл, загрязняющие примеси, окись углерода, метан, окись азота, двуокись азота, двуокись серы, аэрозоль, приземные концентрации, мегаполис; weekly cycle, pollutants, carbon monoxide, methane, nitrogen oxide, nitrogen dioxide, sulfur dioxide, aerosol, surface concentrations, megacity.

Введение

Москва является вторым по количеству населения городом в Европе и входит в число крупнейших мегаполисов мира. В последние годы, несмотря на кризис 1990-х гг., Москва продолжала развиваться. Росло население мегаполиса, расширялась его территория. В 2014 г. число жителей мегаполиса с учетом новых жилых районов, прилегающих со стороны области к Московской кольцевой автомобильной дороге (МКАД), достигло 13,8 млн человек, а площадь мегаполиса — 2200 км² [1]. В инфраструктуре Москвы произошли значительные изменения, которые оказали влияние на состояние

городской атмосферы: уменьшился вклад промышленных предприятий в загрязнение атмосферы и увеличился вклад автотранспорта. По составу и объему выбросов загрязняющих веществ Москва приблизилась к мегаполисам развитых стран (США, страны ЕС, Япония) [1–3].

Характерной особенностью почти всех крупных городов является недельная цикличность качества городского воздуха. Как правило, выбросы загрязняющих веществ наибольшие в рабочие дни и наименьшие в выходные. В зависимости от климатических условий, рельефа местности, городской инфраструктуры и некоторых других факторов проявление недельного цикла в каждом городе имеет свои особенности [4–6], которые учитываются при прогнозировании качества воздуха и вероятности образования экстремальных ситуаций, оказывающих неблагоприятное воздействие на здоровье населения.

Москва является самым северным мегаполисом, расположенным на равнине в глубине континента. Невысокие средние температуры, пониженная солнечная УФ-освещенность и хорошая проветриваемость делают менее активными, чем в других мега-

* Николай Филиппович Еланский (n.f.elansky@mail.ru); Арсений Викторович Шилкин (shilkin@rpatyphoon.ru, dogget@list.ru); Евгения Геннадьевна Семутникова (egsemutnikova@mail.ru); Полина Владимировна Захарова (zaharovapv@eco.mos.ru); Вадим Станиславович Ракитин (vadim@ifaran.ru); Николай Андреевич Пономарев (na.ponomarev@physics.msu.ru); Ярослав Михайлович Веревкин (yarver@gmail.com).

полисах, накопление в приземном воздухе выбрасываемых веществ и фотохимическое образование вторичных, часто токсичных, загрязняющих компонентов (озон, хлорорганические соединения, сверхмелкий аэрозоль и др.). Однако растущие в последние годы частота и продолжительность малоподвижных блокирующих антициклонов уже начинают проявляться в активизации фотохимических процессов [7–9]. Росту окислительной способности атмосферы также способствует переход автотранспорта на новые модели с высокотемпературным сжиганием топлива и повышенным выбросом в атмосферу окислов азота. Первым свидетельством происходящих изменений в атмосфере Москвы и других российских городов стала ускоренная генерация озона и превышение его городской концентрации относительно окружающей сельской местности в летние месяцы [5, 6, 10, 11]. В этой связи исследования недельной цикличности эмиссий и концентраций химически активных соединений в атмосфере городов позволяют заблаговременно выявлять изменения фотохимической системы и точнее прогнозировать изменения качества воздуха.

В настоящей работе впервые анализируются недельные циклы (НЦ) концентрации в приземном воздухе г. Москвы основных загрязняющих примесей (ЗП) CO, CH₄, NO, NO₂, SO₂ и аэрозоля PM₁₀ (масса частиц размером менее 10 мкм) по данным наблюдений, полученных на 46 московских станциях за длительный период с 2005 по 2014 г. Выполненные ранее на ограниченном материале оценки недельного цикла для Москвы показали его наличие [12–14]. Но из-за небольшого объема использованных данных анализировались либо концентрации некоторых из этих примесей по наблюдениям на одной станции в течение всего нескольких месяцев [12], либо только концентрация одного компонента (CO) по наблюдениям на нескольких станциях в течение от 1 года до 6 лет [13, 14].

Материалы и методы

Для исследования временной изменчивости приземной концентрации CO, CH₄, NO, NO₂, SO₂ и PM₁₀ использовались осредненные по 20 мин данные наблюдений, полученные соответственно на 42, 31, 39, 26 и 15 станциях ГПБУ «Мосэкомониторинг» (МЭМ). Из них 9 станций расположены вблизи автомагистралей, 14 – в жилых районах, 15 – в районах с высокой деловой и промышленной активностью, 2 – в парковых зонах (городские фоновые условия), а 6 – в зеленом поясе (региональные фоновые условия) (<http://www.mosecom.ru/air/air-today/>). Станции оборудованы современными приборами, которые ведут измерения в непрерывном режиме в соответствии с требованиями ВМО.

Все данные отфильтрованы от несистематических выбросов, связанных с кратковременным действием случайных источников вблизи станции, например автомобиль с работающим двигателем. Для фильтрации каждый анализируемый ряд данных раскладывался в двумерный массив шириной в ме-

сяц (2232 столбца) и высотой в 10 лет (120 строк). Из каждой строки массива исключался линейный тренд. Далее отбраковывались значения, которые выходили за пределы учетверенного стандартного отклонения, сначала в каждой строке, а затем в каждом столбце массива. Фильтрация проводилась итерациями, пока число отбракованных значений в каждой итерации стремилось к нулю. Для восстановления полученных пропусков каждый отфильтрованный ряд данных раскладывался в двумерный массив шириной в сутки (72 столбца) и высотой в 10 лет (3652 строки). Пропуски в массиве заполнялись скользящим средним в окне шириной в три значения сначала в каждой строке, а затем в каждом столбце массива. Заполнение проводилось итерациями, пока число восстановленных значений в каждой итерации стремилось к нулю. Если после последней итерации в массиве оставались пропуски, то ширина скользящего окна принималась равной пяти значениям. После восстановления пропусков массив данных обратно трансформировался во временной ряд [15]. Для анализа использованы среднесуточные данные, средние дневные значения, полученные в интервале с 07:20 до 00:00, и средние ночные значения – с 00:20 до 07:00 по московскому времени.

Спектральный анализ средних дневных данных методом классических преобразований Фурье показал, что из всех станций МЭМ, измеряющих концентрацию CO, 50% имеют значимые колебания CO с периодом около 7 дней. Для NO, NO₂, SO₂ и PM₁₀ эти отношения равны соответственно 66, 83, 15, и 37%. При этом на всех станциях вблизи автомагистралей зарегистрированы значимые недельные колебания концентрации CO, NO, NO₂ и PM₁₀. Колебания с периодом 7 дней в данных CH₄ по всем станциям присутствуют только на уровне шумов и являются незначимыми. В качестве примера на рис. 1 представлены спектральные плотности мощности колебаний концентрации ЗП вблизи автомагистралей. Наибольшие отношения сигнал-шум в спектре мощности колебаний и, следовательно, наибольшая значимость получены у колебаний с периодом 7 дней по данным CO, NO и NO₂.

Основным источником CO и NO_x в Москве является автотранспорт, интенсивность работы которого в будни и воскресные дни заметно различается. Источниками SO₂ являются металлургические производства, Московский нефтеперерабатывающий завод (МНПЗ), теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) и малые котельные, которые в холодные зимы эпизодически используют резервное жидкое топливо. Интенсивность работы этих предприятий существенно меньше зависит от дня недели по сравнению с автотранспортом. Практически не меняются в течение недели эмиссии метана от жилищного сектора, крупных ТЭЦ, коммунальных служб (очистные сооружения, полигоны твердых отходов и т.д.) и общественного транспорта, работающего на природном газе.

Постоянные наблюдения PM₁₀ в Москве начались сравнительно недавно, причем около половины станций начали измерения только в 2014 г. Для выделения НЦ со статистически значимым результатом

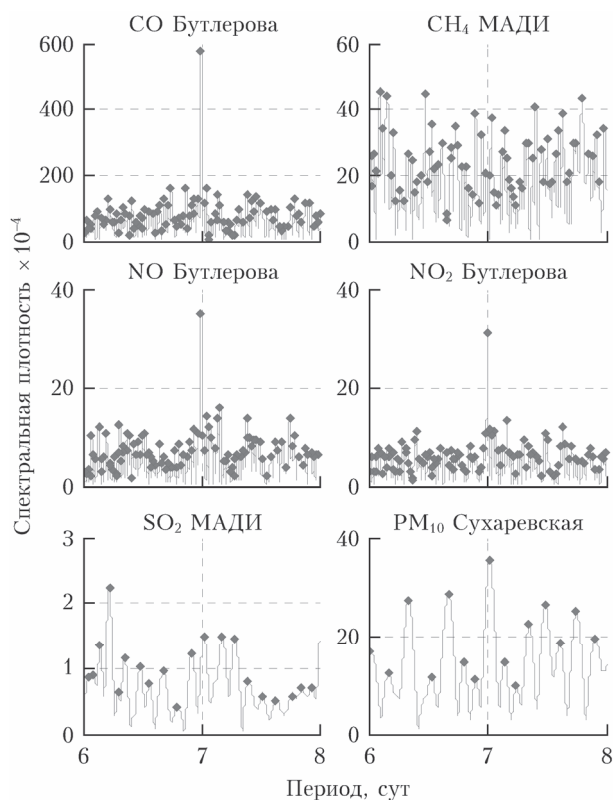
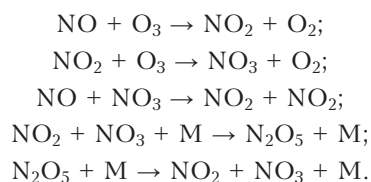


Рис. 1. Спектры мощности колебаний средней дневной концентрации загрязняющих примесей вблизи автомагистралей

длины таких рядов недостаточно. Поэтому в спектральном анализе недельные колебания проявляются на уровне шумов. В качестве исключения выделяются две станции: Марьино и Останкино, измерения PM_{10} на которых ведутся с 2006 г. В спектрах их данных получены значимые недельные колебания. Основным антропогенным источником PM_{10} в Москве является грузовой и общественный автотранспорт с устаревшими или неисправными дизельными двигателями, в которых кроме топлива сгорает машинное масло. Также источниками крупного аэрозоля являются истирание дорожного полотна и шин автотранспорта, а в зимний и весенний сезоны — дополнительно поднимаемая ветром взвесь химического реагента и частиц почвы. Связанные с автотранспортом источники определяют недельные колебания приземной концентрации аэрозоля.

Спектральная плотность недельных колебаний ночных концентраций всех примесей, за исключением NO_2 , находится на уровне шумов. Это связано с особенностями образования и разрушения NO_2 в отсутствие солнечного освещения:



Поскольку концентрация озона в Москве в вечернее время меньше концентрации NO , то макси-

мум концентрации NO_2 наблюдается с задержкой на несколько часов после вечернего максимума NO . На рассвете под действием УФ-радиации происходит фотодиссоциация N_2O_5 , что в летний период дополнительно приводит к увеличению ночной концентрации NO_2 (до 07:00).

Временные вариации концентрации каждой примеси на разных станциях МЭМ имеют отличные друг от друга математические ожидания и дисперсии, поэтому для дальнейшего анализа из всех данных исключены их линейные тренды и колебания с периодом больше 8 сут методом обратных преобразований Фурье. Полученные вариации нормированы на 100% почленным делением на их же удвоенное стандартное отклонение. В результате получены вариации каждой примеси на разных станциях с одинаковыми дисперсиями и нулевыми математическими ожиданиями, что позволило усреднить их между собой и получить средние вариации с колебаниями от 1 до 8 сут в относительных единицах, характеризующие недельные колебания в среднем по Москве.

Для выделения НЦ использовался метод наложенных эпох, реперными точками в котором послужили все воскресенья анализируемых временных рядов. Полученные НЦ характеризуют изменения средней по территории Москвы концентрации ЗП в течение средней за 10 лет недели с повышенными значениями со вторника по пятницу и пониженными — в субботу и воскресенье.

Временные вариации

В табл. 1 приведены амплитуды НЦ загрязняющих примесей и их средние концентрации, полученные по многолетним дневным, ночным и среднесуточным данным, осредненным по всем станциям МЭМ, находящимся в пределах города. Амплитуда по дневным и среднесуточным данным — уменьшение воскресного значения концентрации ЗП относительно среднего значения за рабочие дни с понедельника по пятницу. Амплитуда по ночным данным — уменьшение концентрации в понедельник относительно среднего значения за среду — субботу. Амплитуда CH_4 во всех случаях — уменьшение концентрации в понедельник относительно среднего значения за вторник — субботу. Значимые и находящиеся на уровне значимости амплитуды и их 95%-е интервалы надежности, не пересекающие нулевую линию, обозначены полужирным шрифтом.

Наибольшее уменьшение концентрации в воскресенье испытывают те примеси, источником которых является автотранспорт: CO , NO и NO_2 . Концентрации SO_2 и PM_{10} в меньшей степени зависят от автотранспорта. Значительное влияние на них оказывают постоянно действующие источники — промышленные и теплоэлектроэнергетические предприятия. Их дневные амплитуды меньше, чем у CO , NO и NO_2 .

Поскольку природный газ используют в качестве топлива всего несколько процентов автомобилей, то временная цикличность движения автомобилей

Таблица 1

Осредненные по территории Москвы и за период наблюдений с 2005 по 2014 г. приземные концентрации примесей и дневные, ночные и среднесуточные амплитуды недельных циклов

Примесь	Средняя концентрация, мг/м ³	Амплитуда, %		
		дневная	среднесуточная	ночная
СО	0,521 ± 0,220	25,4 ± 6,1	17,8 ± 6,0	4,5 ± 5,1
СН ₄	1,324 ± 0,114	3,8 ± 7,1	3,3 ± 7,0	1,4 ± 6,9
NO	0,020 ± 0,014	26,1 ± 6,3	21,8 ± 6,6	6,6 ± 5,7
NO ₂	0,035 ± 0,012	33,0 ± 5,3	27,9 ± 5,6	10,7 ± 5,3
SO ₂	0,004 ± 0,003	12,0 ± 7,9	11,8 ± 7,9	9,2 ± 7,1
PM ₁₀	0,023 ± 0,009	22,5 ± 8,7	16,7 ± 9,0	8,9 ± 7,7

по городу практически не влияет на недельные вариации метана. Мало зависят от дня недели и основные источники СН₄ – утечки в системе городского газоснабжения. Поэтому малые амплитуды НЦ для СН₄ отмечаются днем и ночью, однако они не являются значимыми.

Амплитуды недельных колебаний всех измеряемых ЗП не постоянны во времени и меняются в зависимости от сезона, что, в частности, отмечалось в [14, 16] по наблюдениям СО и NO₂ на нескольких станциях.

На рис. 2 представлены отклонения дневной, ночной и среднесуточной концентраций примесей в каждый день недели от средних значений за те же временные периоды, относительно которых определялись амплитуды НЦ, приведенные в табл. 1 (т.е. относительно дней недели с наиболее высокими концентрациями ЗП). Изменения концентрации рассчитаны для каждого сезона и в среднем за год. Дневные концентрации СО, NO и NO₂ демонстрируют ярко выраженный недельный цикл во все сезоны. Наибольшие отклонения приходятся на воскресенье. Для каждой из этих примесей максимальное воскресенье снижение концентрации отмечается в зимний период. Для СО оно составляет (29,2 ± 13,1)%, для NO – (38,1 ± 16,0)% и для NO₂ – (34,8 ± 12,6)%.

Несколько факторов определяют такой сезонный эффект: во-первых, зимой активен автотранспорт и с наибольшей нагрузкой действуют предприятия тепло- и электроэнергетики; во-вторых, пограничный слой атмосферы над городом наиболее устойчив, а толщина слоя перемешивания минимальна; в-третьих, низкий уровень УФ солнечной освещенности и низкая концентрация летучих органических соединений (ЛОС) и озона замедляют процессы окисления СО и переход NO в NO₂ и NO_x в NO₃, N₂O₅ и HNO₃. Влияние O₃ на содержание NO в приземном воздухе отчетливо проявляется в больших различиях воскресных отклонений NO весной и осенью при примерно одинаковых антропогенных эмиссиях. Осенью концентрация O₃ находится на самом низком уровне, который существенно ниже концентрации NO, что ограничивает переход NO в NO₂. Весной, когда концентрация O₃ максимальна, практически весь выброшенный в атмосферу оксид азота быстро переходит в диоксид азота и при большей солнечной освещенности (меньшей облачности) быстрее достигается состояние фо-

тохимического равновесия между NO_x, O₃ и ЛОС при характерном для него понижении концентрации NO.

Амплитуды НЦ SO₂ и PM₁₀ максимальны осенью и равны соответственно (22,7 ± 16,2)% и (35,2 ± 21,0)%. Основным поставщиком SO₂ в атмосферу Москвы являются МНПЗ и котельные. При подготовке к зимнему отопительному периоду (сентябрь – октябрь) производятся пробные пуски системы отопления в Москве с использованием, в том числе жидкого топлива, что приводит к повышенным выбросам SO₂. Возможно, поэтому и аварийные выбросы SO₂ на МНПЗ чаще происходят в сентябре – ноябре в рабочие дни. Например, в 2014 г. произошло 20 таких выбросов, которые отмечались МЭМ в виде резкого увеличения концентрации SO₂ одновременно на нескольких станциях. В зимний период, когда тепло- и электроэнергетические предприятия при очень низких температурах прибегают к использованию резервного жидкого топлива, недельный ход дневных и ночных значений почти одинаков и эффект уменьшения выбросов в воскресенье не проявляется, как это и должно быть.

Концентрация аэрозоля имеет ярко выраженный минимум в воскресные дни. В среднем за год прослеживается небольшое увеличение концентрации PM₁₀ со вторника по пятницу. Подобный эффект накопления отсутствует в недельной изменчивости газовых составляющих, что позволяет связать PM₁₀ с движением тяжелых грузовиков на дизельном топливе. Въезд таких грузовиков в пределы города, обозначенные МКАД, ограничен, а интенсивность их движения возрастает к концу рабочей недели, что определяется системой обеспечения Москвы продуктами и различными товарами.

В ночных рядах данных недельный цикл либо полностью отсутствует, либо находится на уровне значимости для всех примесей, за исключением NO₂. Среднегодовая амплитуда NO₂ достигает (10,7 ± 5,3)%. Воскресный эффект наиболее заметен в холодное время года, когда диссоциация NO₂ и переход NO_x в NO₃ и N₂O₅ затруднены. Концентрации NO и NO₂ наибольшие в ночь с четверга на пятницу и с пятницы на субботу. Самые чистые ночи – с субботы на воскресенье и с воскресенья на понедельник. Такая изменчивость отражает ночную активность автотранспорта в течение недели. Подобный эффект отмечается и в других крупных городах мира [5, 6].

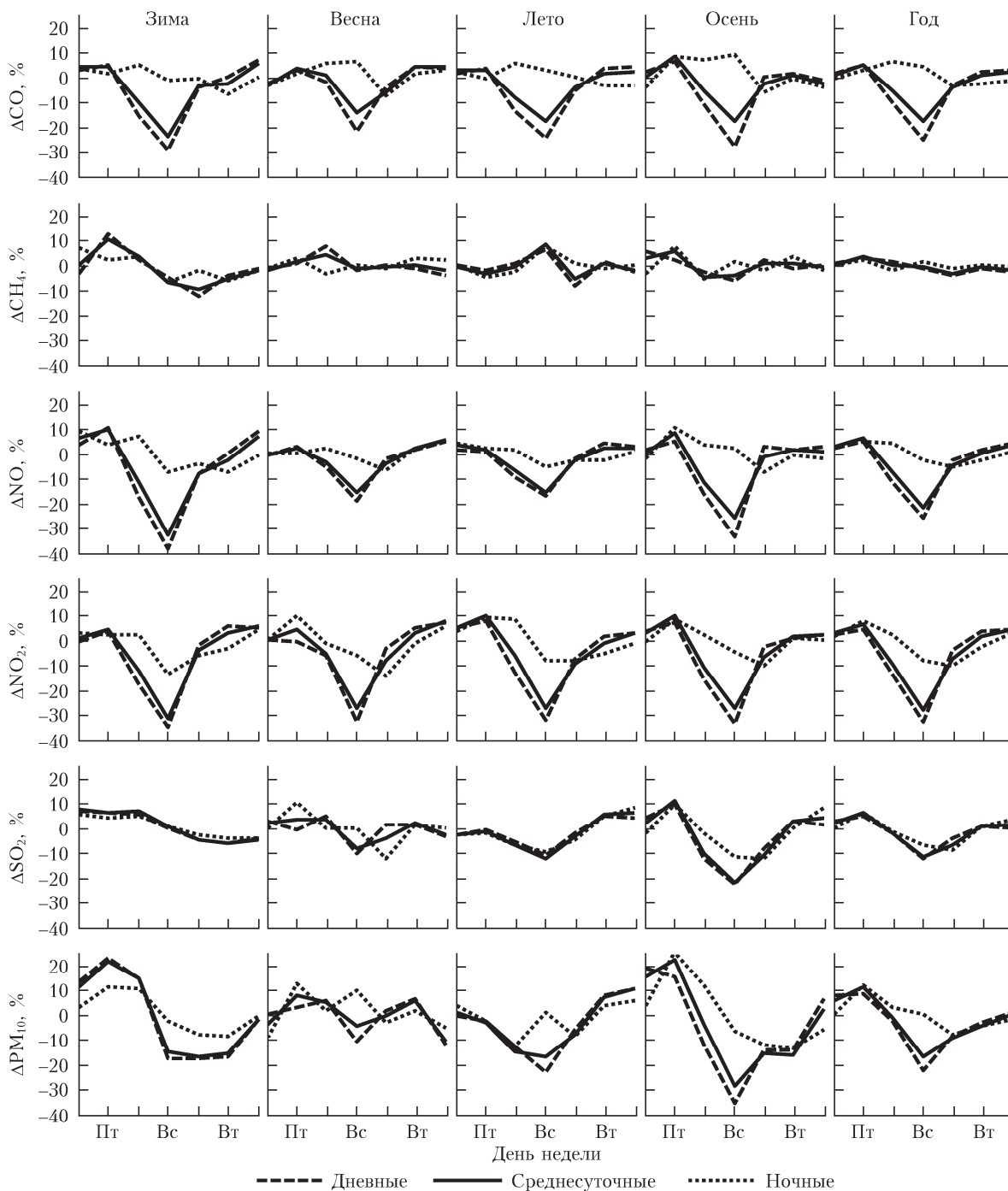


Рис. 2. Недельные вариации средней по территории Москвы и по сезонам приземной концентрации примесей (наблюдения с 2005 по 2014 г.). Дневные и среднесуточные вариации – отклонения от средних значений за пн–пт. Ночные вариации – отклонение от средних значений за ср–сб. Все вариации CH_4 – отклонения от средних значений за вт–сб

Ночью, как и днем, в концентрации газовых составляющих не проявляется накопление примесей в течение рабочей недели, что подтверждает хорошую проветриваемость Москвы. Очевидное ночное увеличение концентрации аэрозоля с понедельника по пятницу также вызвано скорее не его накоплением в приземном слое атмосферы, а повышенной круглосуточной активностью крупногабаритного транспорта в течение рабочей недели.

Суббота в недельном ходе загрязняющих примесей занимает промежуточное положение между рабочими днями и воскресеньем. Характерной особенностью является минимальное отклонение субботней концентрации ЗП от средних значений за рабочие дни в весенний период. Такое повышенное загрязнение в субботу можно связать с регулярными выездами москвичей на дачи утром в этот день и возвращением вечером в воскресенье. Именно в эти дни в апреле–мае

наблюдается наибольшая загруженность городских и подмосковных автомагистралей.

Пространственные вариации

Проявления недельного цикла в разных районах Москвы имеет свои особенности. В табл. 2 приведены средние многолетние амплитуды НЦ (снижение концентрации примесей в воскресенье относительно понедельника—пятницы) по средним дневным данным (07:20—00:00 по московскому времени) для пяти городских секторов и окружающего Москву зеленого пояса. Характерной для большого города особенностью являются максимальные амплитуды CO, NO и NO₂ в центральной части города, ограниченной Садовым кольцом (диаметр около 5 км). Здесь сосредоточены административные учреждения и офисы компаний, которые в большинстве своем пусты в субботу—воскресенье. Соответственно, движение транспорта — основного источника CO и NO_x в центре города — в это время наименее активное. Подобный эффект отмечается и в юго-западном секторе, где сосредоточены жилые кварталы и проходят основные автомагистрали, соединяющие центр города с жилыми окраинами. Малые амплитуды характерны для юго-восточного сектора. Здесь большая доля выбросов связана с промышленными и тепло- и электроэнергетическими предприятиями непрерывного цикла работы. Кроме того, значительная часть территории этого сектора занята московскими очистными сооружениями, складскими и железнодорожными хозяйственными строениями, а движение автотранспорта здесь малоинтенсивное.

Другие факторы ответственны за минимальные амплитуды недельного цикла CO, NO и NO₂ в северо-восточном секторе. Большую его часть занимает лесная зона (часть национального парка «Лосиный остров» и другие крупные лесные массивы). Автомобильное движение здесь менее напряженное, чем в Москве, что видно по минимальным амплитудам недельного цикла CO, NO и NO₂. Однако большие вариации метана и максимальные амплитуды SO₂ свидетельствуют о возможной адвекции этих антропогенных примесей из ближайших промышленных городов, расположенных в северо-восточных и вос-

точных окрестностях Москвы. Недельный цикл в концентрации аэрозоля PM₁₀ мало меняется по территории города, но при этом наибольшая амплитуда относится к юго-западному сектору с напряженным автомобильным движением.

Характеристики недельного цикла в разных секторах Москвы в теплое и холодное время года для всех примесей, за исключением NO, практически одинаковы. Амплитуда НЦ NO в теплый сезон в 1,5–2 раза меньше, чем в холодный, во всех округах Москвы. Лишь в одном северо-восточном секторе резко увеличивается в холодный сезон амплитуда SO₂, что подтверждает влияние на этот округ переноса загрязнений от подмосковных городов, где выбросы SO₂ могут быть значительными в отопительный период из-за использования жидкого топлива в небольших подмосковных котельных [1].

Как видно из табл. 2, вариации параметров недельного цикла по территории Москвы для каждой отдельной примеси в целом сравнительно невелики. Это говорит о довольно однородном загрязнении атмосферы над городом и превалировании вклада автотранспорта среди всех других источников. Только в пространственном распределении SO₂ заметно проявляются неоднородности, вызванные промышленными выбросами МНПЗ и адвекцией загрязнений от окрестных малых промышленных предприятий в зимний период.

В окружающем Москву зеленом поясе характер изменения приземной концентрации примесей в течение недели резко отличается от городского (см. табл. 2). Полностью отсутствует воскресный эффект в изменчивости CO, CH₄ и SO₂. На уровне значимости находится амплитуда НЦ PM₁₀, и только NO и NO₂ демонстрируют значительное уменьшение в воскресенье. В зеленом поясе действуют 6 станций, которые располагаются на расстоянии от 30 до 70 км от центра Москвы в небольших населенных пунктах.

На территории зеленого пояса в последние десятилетия к многочисленным дачным владениям с временным проживанием москвичей в летний сезон и эпизодическим посещением в субботние и воскресные дни в остальное время года добавилось большое число коттеджных поселков, в которых проживание стало круглогодичным. В 2000-е гг. это привело

Таблица 2

Средние дневные амплитуды недельного цикла (%) в различных секторах Москвы (2005–2014 гг.)

Сектор	CO	CH ₄	NO	NO ₂	SO ₂	PM ₁₀
Центр	39,2 ± 3,4	4,0 ± 4,0	32,8 ± 3,5	36,5 ± 3,5	14,4 ± 5,2	24,8 ± 4,6
СЗ	30,6 ± 3,5	1,6 ± 4,0	31,7 ± 3,6	34,2 ± 3,6	6,6 ± 5,5	26,3 ± 5,1
СВ	22,5 ± 3,6	18,5 ± 14,3	27,0 ± 4,1	30,9 ± 3,9	25,5 ± 5,3	—
ЮЗ	35,1 ± 3,6	1,5 ± 4,0	30,2 ± 3,3	33,5 ± 3,3	17,1 ± 3,6	29,5 ± 4,8
ЮВ	23,9 ± 3,4	3,8 ± 3,7	27,7 ± 3,6	34,0 ± 3,3	11,5 ± 3,8	25,3 ± 4,2
Вся Москва	25,4 ± 6,1	3,8 ± 7,1	26,1 ± 6,3	33,0 ± 5,3	12,0 ± 7,9	22,5 ± 8,7
Вся Москва без автомагистралей	22,8 ± 5,8	4,5 ± 7,3	24,9 ± 6,1	32,3 ± 5,3	11,1 ± 7,5	22,3 ± 8,8
Зеленый пояс	3,1 ± 5,1	0,5 ± 5,2	16,7 ± 5,0	20,2 ± 4,8	-0,3 ± 7,6	9,8 ± 11,1

к регулярному превышению пропускной способности всех подмосковных автомобильных дорог и образованию многочасовых пробок в субботние, воскресные и праздничные дни. По сути, в выходные дни наивысшая активность транспорта смещалась из центральной части Москвы в ее окрестности. Подобное смещение охватывает и близко расположенные города Московской области. Учитывая густую сеть автомобильных дорог и тот факт, что время жизни CO, SO₂, NO_x и PM₁₀ превышает одни сутки, повышение концентрации этих примесей от автотранспорта в выходные дни распространяется на всю территорию зеленого пояса. Такой эффект перемешивания также заметен на результатах оценки амплитуды недельного цикла всех примесей для территории Москвы с учетом и без учета данных тех станций, которые расположены вблизи автомагистралей (см. табл. 2). Исключение таких станций очень мало повлияло на среднюю амплитуду НЦ CO и почти не повлияло на НЦ других примесей. Однако если для CO такой эффект связан с движением автотранспорта, то на NO и NO₂ сказывается также их зависимость от химических процессов с участием O₃ и ЛОС. В окрестностях Москвы концентрации O₃ и ЛОС выше, чем в городе, из-за меньшего разрушения озона в приземном воздухе и дополнительного вклада биогенных источников ЛОС в лесной местности [17]. В действии этих источников нет недельной периодичности, и в результате фотохимическая активность NO и NO₂ снижает эффект недельного цикла. Отсутствие в зеленом поясе НЦ в концентрациях SO₂ и PM₁₀ объясняется как влиянием автотранспорта, так и рассредоточенными по всей его территории мелкими антропогенными и природными источниками, которые действуют либо постоянно, либо эпизодически и не проявляют явно недельной цикличности.

Заключение

Как и в других крупных городах, в Москве ярко проявляется недельная цикличность в изменениях приземной концентрации основных загрязняющих газовых примесей и аэрозоля. Благодаря географическому положению Москвы (высокие широты, континентальный климат, расположение на равнине) и особой инфраструктуре (почти полная газификация предприятий и жилищного сектора) проявление недельного цикла в разные сезоны и в разных районах города имеет характерные особенности, отличные от других мегаполисов мира. Для их определения впервые использован 10-летний архив данных наблюдений состава атмосферы на 46 станциях ГПБУ «Мосэкомониторинг». Не только по общему уровню загрязнения атмосферного воздуха, но и по состоянию фотохимической системы Москва приблизилась к крупным мегаполисам Европы и Северной Америки. Состав городского воздуха и его изменчивость определяет автотранспорт. Под его воздействием дневные амплитуды НЦ CO меняются от 21,8% весной до 29,2% зимой (средние по сезону

и по территории города) и от 22,5% в северо-восточном секторе до 39,2% в центре города (многолетние средние по секторам). Примерно такие же средние дневные амплитуды НЦ наблюдаются в Мехико [5], Южной Калифорнии [18] и других мегаполисах с развитым автотранспортом [19]. В то же время амплитуды НЦ концентраций NO и NO₂ в Москве (26–30%) заметно меньше, чем в Мехико (40–60%) [5]. В атмосфере Мехико и других более южных мегаполисов скорость фотохимических процессов очень высокая и при значительных выбросах в течение рабочей недели NO_x и летучих органических соединений происходит активное образование озона. В Москве благодаря малой доле промышленных выбросов NO_x и ЛОС, а также централизованной системе отопления, базирующейся на крупных ТЭЦ с выбросом продуктов горения на большой высоте, приземные концентрации NO_x и ЛОС сравнительно невелики и концентрация озона очень редко достигает опасного для здоровья населения уровня.

Концентрации SO₂ и PM₁₀ и амплитуды их недельного цикла, по сравнению с другими мегаполисами, зависят не только от автотранспорта, но и от многих других факторов, в частности погодных условий. Эпизодическое использование жидкого топлива тепло- и электроэнергетическими предприятиями, подъем аэрозоля с поверхности земли при отсутствии растительности в весенний период и адвекция этих примесей из малых окрестных городов заметным образом сказываются на их в целом невысоком городском уровне и делают недельную цикличность слабовыраженной. Во временной изменчивости CH₄ значимый недельный цикл отсутствует, хотя концентрация метана в Москве значительна. Однако слабые проявления цикличности в пространственной и временной изменчивости метана позволяют идентифицировать его источники и определить их роль в изменчивости региональной климатической системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 16-17-10275). В работе использованы данные наблюдений, проведенных при поддержке РФФИ (грант № 16-05-00109).

Работа выполнена в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН.

1. *Elansky N.F., Ponomarev N.A., Verevkin Y.M.* Air quality and pollutant emissions in the Moscow megacity in 2005–2014 // *Atmos. Environ.* 2018. V. 175, N 2. P. 54–64.
2. *Butler T.M., Lawrence M.G., Gurjar B.R., van Aardenne J., Schultz M., Leliveld J.* The representation of emission from megacities in global emissions inventories // *Atmos. Environ.* 2008. V. 42, N 4. P. 703–719.
3. *Elansky N.* Air quality and CO emissions in the Moscow megacity // *Urban Clim.* 2014. V. 8. P. 42–56.
4. *Murphy J.G., Day D.A., Cleary P.A., Wooldridge P.J., Millet D.B., Goldstein A.H., Cohen R.C.* The weekend effect within and downwind of Sacramento – Part 1: Observations of ozone, nitrogen oxides, and VOC reactivity // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7. P. 5327–5339.
5. *Stephens S., Madronich S., Wu F., Olson J.B., Ramos R., Retama A., Muñoz R.* Weekly patterns of México City's surface concentrations of CO, NO_x, PM₁₀, and O₃ du-

- ring 1986–2007 // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. V. 8. P. 5313–5325.
6. Yoo J.-M., Jeong M.-J., Kim D., Stockwell W.R., Yang J.-H., Shin H.-W., Lee M.-I., Song C.-K., Lee S.-D. Spatiotemporal variations of air pollutants (O₃, NO₂, SO₂, CO, PM₁₀, and VOCs) with land-use types // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. P. 10857–10885.
 7. Мохов И.И. Особенности формирования летней жары 2010 г. на европейской территории России в контексте общих изменений климата и его аномалий // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2011. Т. 47, № 6. С. 709–716.
 8. Еланский Н.Ф., Мохов И.И., Беликов И.Б., Березина Е.В., Елохов А.С., Иванов В.А., Панкратова Н.В., Постыляков О.В., Сафронов А.Н., Скороход А.И., Шумский Р.А. Газовые примеси в атмосфере над Москвой летом 2010 г. // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2011. Т. 47, № 6. С. 729–738.
 9. Кузнецова И.Н. Влияние метеорологических условий на загрязнение воздуха Москвы в летних эпизодах 2010 г. // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2012. Т. 48, № 5. С. 566–577.
 10. Панкратова Н.В., Еланский Н.Ф., Беликов И.Б., Лаврова О.В., Скороход А.И., Шумский Р.А. Озон и окислы азота в приземном воздухе Северной Евразии по наблюдениям в экспериментах TROICA // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2011. Т. 47, № 3. С. 343–358.
 11. Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Трифанова А.В., Беликов И.Б., Скороход А.И. О содержании малых газовых примесей в приземном слое атмосферы над Москвой // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2015. Т. 51, № 1. С. 39–51. DOI: 10.7868/S0002351515010034.
 12. Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Исаков А.А., Копейкин В.М., Карпов А.В., Курбатов Г.А., Лезина Е.А., Пономарева Т.Я., Соколов А.В. Московская дымная мгла 2010 г. Экстремальное аэрозольное и газовое загрязнение воздушного бассейна Московского регио-
на // *Оптика атмосфер. и океана.* 2011. Т. 24, № 6. С. 452–458.
 13. Gorchakov G.I., Semutnikova E.G., Baikova E.S., Karпов A.V. The weekly cycle of diurnal variation of the carbon monoxide concentration in the surface and boundary layers of the urban atmosphere // *Doklady Earth Sciences.* 2014. V. 455, Part 2. P. 425–429. DOI: 10.1134/S1028334X14040059.
 14. Ситнов С.А., Адикс Т.Г. Недельная изменчивость приземных концентраций СО в Москве // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2014. Т. 50, № 2. С. 185–196. DOI: 10.7868/S0002351514020114.
 15. Алферова А.М., Блинов В.Г., Гитарский М.Л., Грабар В.А., Замолодчиков Д.Г., Зинченко А.В., Иванова В.М., Ивахов В.М., Карabanь Р.Т., Карелин Д.В., Калужный И.Л., Кашин Ф.В., Колюшков Д.Е., Коротков В.Н., Кровотынцев В.А., Лавров С.А., Марунич А.С., Парамонова Н.Н., Романовская А.А., Трунов А.А., Шилкин А.В., Юзбеков А.К. Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах. Саратов: Амирит, 2017. 279 с.
 16. Груздев А.Н. О недельной цикличности в атмосфере // *Докл. РАН.* 2011. Т. 439, № 3. С. 407–412.
 17. Еланский Н.Ф., Беликов И.Б., Голицын Г.С., Гриценко А.М., Лаврова О.В., Панкратова Н.В., Сафронов А.Н., Скороход А.И., Шумский Р.А. Наблюдения состава атмосферы в Московском мегаполисе с передвижной лаборатории // *Докл. РАН.* 2010. Т. 432, № 2. С. 250–256.
 18. Blanchard C.L., Tanenbaum S.J. Differences between weekday and weekend air pollutant levels in Southern California // *J. Air Waste Manage. Assoc.* 2003. V. 53. P. 816–828.
 19. Beirle S., Platt U., Wenig M., Wagner T. Weekly cycle of NO₂ by GOME measurements: a signature of anthropogenic sources // *Atmos. Chem. Phys.* 2003. V. 3. P. 2225–2232. DOI: 10.5194/acp-3-2225-2003.

N.F. Elansky, A.V. Shilkin, E.G. Semutnikova, P.V. Zaharova, V.S. Rakitin, N.A. Ponomarev, Y.M. Verevkin. The weekly cycle of pollutant concentrations in the surface air above Moscow.

The temporal variability of the concentrations of air pollutants CO, NO, NO₂, SO₂ and PM₁₀ in the surface air layer above Moscow shows a weekly cycle, which is manifested in a decrease in the pollution level on weekends. To determine the main feature of the weekly variations and the amplitude of the weekly cycle, a 10-year archive of data on atmospheric composition from 46 “Mosecomonitoring” stations was used for change first time. The city and season average amplitudes of weekly variations in the daytime concentrations of CO vary from 21.8% in spring to 29.2% in winter, and of NO, from 16.9% in summer to 38.1% in winter. The weekly cycle of NO₂ daily concentration is stable during the year, and its amplitude is 33% on average. Amplitudes of weekly variations in SO₂ and PM₁₀ are maximal in daytime data and equal to 22.7% and 35.2%, respectively, in autumn; the CH₄ weekly cycle is insignificant. A weekly cycle in night concentrations of these pollutants is significant only for NO₂. The analysis of the data obtained for different Moscow districts shows approximately the same Sunday effect. Only CO concentrations have increased amplitudes in the city centre (39.2%) and southwestern sector (35.1%).