

УДК 551.510.42

Изменчивость концентраций основных загрязнителей воздуха в Лондоне

А.М. Звягинцев¹, И.Н. Кузнецова², О.А. Тарасова³, И.Ю. Шалыгина^{2*}

¹Государственное учреждение «Центральная аэрологическая обсерватория»
141700, г. Долгопрудный, Московская обл., ул. Первомайская, 3, Россия

²Государственное учреждение «Гидрометцентр России»
123242, г. Москва, Б. Предтеченский пер., 11–13, Россия

³World Meteorological Organization,
7bis, avenue de la Paix, Case postale 2300, CH-1211 Geneva 2, Switzerland

Поступила в редакцию 27.11.2013 г.

Определены основные характеристики изменчивости концентраций главных загрязнителей воздуха: озона, монооксида и диоксида азота, монооксида углерода, диоксида серы, а также взвешенных частиц — в Лондоне за период 2000–2012 гг. Уровень загрязнений в Лондоне сопоставим с соответствующим уровнем в Москве. В дневное время суточный ход озона противоположен ходу первичных загрязнителей атмосферы; также противоположны и их сезонные ходы. Это указывает на определяющую роль вертикального перемешивания в суточной и сезонной изменчивости указанных загрязнителей. Для всех загрязнителей воздуха наблюдается «эффект выходного дня». Приведены статистические данные эпизодов с повышенными уровнями концентраций загрязнителей. В долговременной изменчивости уровни первичных загрязнителей атмосферы (особенно SO₂ и CO) уменьшаются, озона, скорее, возрастают.

Ключевые слова: качество воздуха в Лондоне, первичные и вторичные загрязнители воздуха, периодическая и аperiodическая изменчивость, эффект выходного дня, эпизоды высокого загрязнения воздуха; air quality in London, primary and secondary air pollutants, periodic and aperiodic variability, weekend effect, air pollution episodes.

Введение

Загрязнение воздуха считается одной из наиболее острых проблем, оказывающих отрицательное влияние на здоровье и качество жизни. Как показано в [1], воздействие высоких уровней загрязнения воздуха в форме твердых частиц (PM₁₀) привело в урбанизированных регионах к преждевременной смерти 1,3 млн человек в 2008 г. Большинство населения, подвергающегося влиянию повышенного уровня загрязнений, проживает в крупных городах-мегаполисах [2, 3], и процент городского населения увеличивается.

Для определения качества воздуха и динамики его изменений необходимы регулярные измерения газового и аэрозольного состава атмосферы в городах и их постоянный анализ. В работах [4–6] установлены некоторые основные закономерности изменчивости компонентов загрязнения в воздухе Москвы и проведено их сравнение с аналогичными показателями в некоторых крупных мегаполисах мира. В [7] выделена периодическая изменчивость основных загрязнителей воздуха в Москве и Киеве и показано, что ее основные характеристики как качественно,

так и количественно близки соответствующим характеристикам в Лондоне.

Отличительными особенностями данных по загрязнению воздуха в Лондоне являются их общедоступность в реальном времени, высокое качество, широкий охват территории и длительность наблюдений, приемлемая для представительного анализа. Цель настоящей работы заключается в комплексном анализе временной изменчивости содержания основных загрязнителей в городской атмосфере Лондона (географические координаты метеостанции аэропорта Хитроу, расположенного в западной части города: 51°29' с.ш., 0°27' з.д., 24 м над ур.м.).

Данные рядов наблюдений

Были использованы средние за 1 ч концентрации озона, монооксида азота NO, диоксида азота NO₂, монооксида углерода CO, диоксида серы SO₂, взвешенных частиц PM_{2,5} и PM₁₀ (по терминологии [8]; другие названия — взвешенные вещества, твердые частицы), полученные за период 2000–2012 гг. и размещенные на сайте <http://www.londonair.org.uk>. Особенностью данных рядов наблюдений является их внутренняя гармонизация (использование одинаковых измерительных приборов и методов контроля качества наблюдений на всех рассматриваемых станциях). Расположение основных пунктов наблюдений (не всех) городского загрязнения в Лондоне представлено на рис. 1.

* Анатолий Михайлович Звягинцев (azvyagintsev@cao-gtms.ru); Ирина Николаевна Кузнецова (muza@mecom.ru); Оксана Алексеевна Тарасова (OTarasova@yandex.ru); Ирина Юрьевна Шалыгина (irus_76@mail.ru).

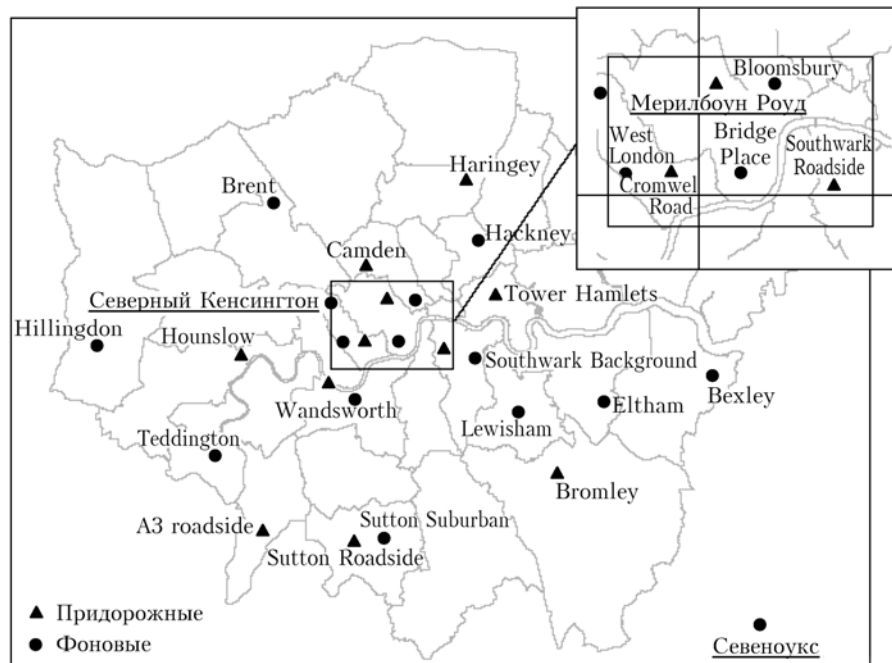


Рис. 1. Расположение станций контроля качества атмосферы в Лондоне

Практически все станции наблюдения относятся к группам городских фоновых и придорожных станций, несколько станций обозначены как промышленные или пригородные. Для анализа также использованы ряды средних за 1 ч концентраций озона на сельских станциях Харвелл ($51^{\circ}34'$ с.ш., $1^{\circ}19'$ з.д., 137 м над ур.м.) и Викин Фен ($52^{\circ}18'$ с.ш., $0^{\circ}18'$ з.д., 5 м над ур.м.), полученные в рамках наблюдений по программе ЕМЕР, и ежедневные направления переноса воздушных масс в пограничном слое атмосферы, рассчитанные центром ЕМЕР/МСС-В (<http://www.emep.int>) по двумерным траекториям длительностью 96 ч [9, 10] для ст. Викин Фен. Такие двумерные траектории отображают крупномасштабное движение воздушных масс; внутри города мелкомасштабные особенности типа городских каньонов могут оказывать значительное влияние на перераспределение загрязнений.

Сезонная и суточная изменчивость загрязнителей воздуха

В работах [7, 11, 12] показана целесообразность представления периодической изменчивости основных загрязнителей атмосферы в виде контурных сезонно-суточных диаграмм, которые наглядно показывают взаимосвязь изменчивостей различных компонентов как по сезонам, так и внутри суток. Изменчивость концентраций загрязнителей воздуха проиллюстрирована, главным образом, на данных двух станций: Северный Кенсингтон (СК) и Мерилбоун Роуд (МР), расположенных примерно в 2 км друг от друга (на рис. 1). Обе станции находятся в центре Лондона. Первая расположена рядом с крупным парком и является фоновой городской, одной из самых «чистых»,

вторая — придорожной, одной из самых «грязных» (отбор воздуха здесь ведется на высоте 2,5 м и на расстоянии 1,5 м от оживленной транспортной магистрали).

Средняя многолетняя сезонно-суточная изменчивость различных малых газовых составляющих воздуха и аэрозолей на станциях СК и МР представлена на рис. 2 и 3.

Видно, что два типа станций — городские фоновые и придорожные — существенно различны по уровню наблюдаемых концентраций всех рассматриваемых компонентов, но имеют качественно схожий сезонно-суточный ход. При этом на городской фоновой станции сезонный и суточный ход практически всех рассматриваемых компонентов проявляется более отчетливо и близок к соответствующему ходу на сельских станциях Западной Европы [12].

Наиболее просты в интерпретации суточный и сезонный ходы СО. В большинстве случаев СО является химически неактивным компонентом воздуха и имеет значительный срок жизни — от 10 дней в жаркое время в тропиках до года в полярных широтах [13]. Его основным источником являются автотранспорт, выбросы ТЭЦ и др., а основным стоком — реакция с гидроксильным радикалом. Поэтому суточный и сезонный ход СО на станциях Лондона обусловлен динамикой антропогенных выбросов и их переносом, в том числе вертикальным.

В отдаленных фоновых регионах мира (в частности, островов Тихого, Атлантического и других океанов) и высокогорных пунктах наблюдений (на высоте более 3 км над ур.м.) для СО характерны концентрации $100\text{--}150\text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$, причем концентрации максимальны в холодный сезон, минимальны в теплый и имеют слабый суточный ход [<http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdceg/>]. Качественно схожие

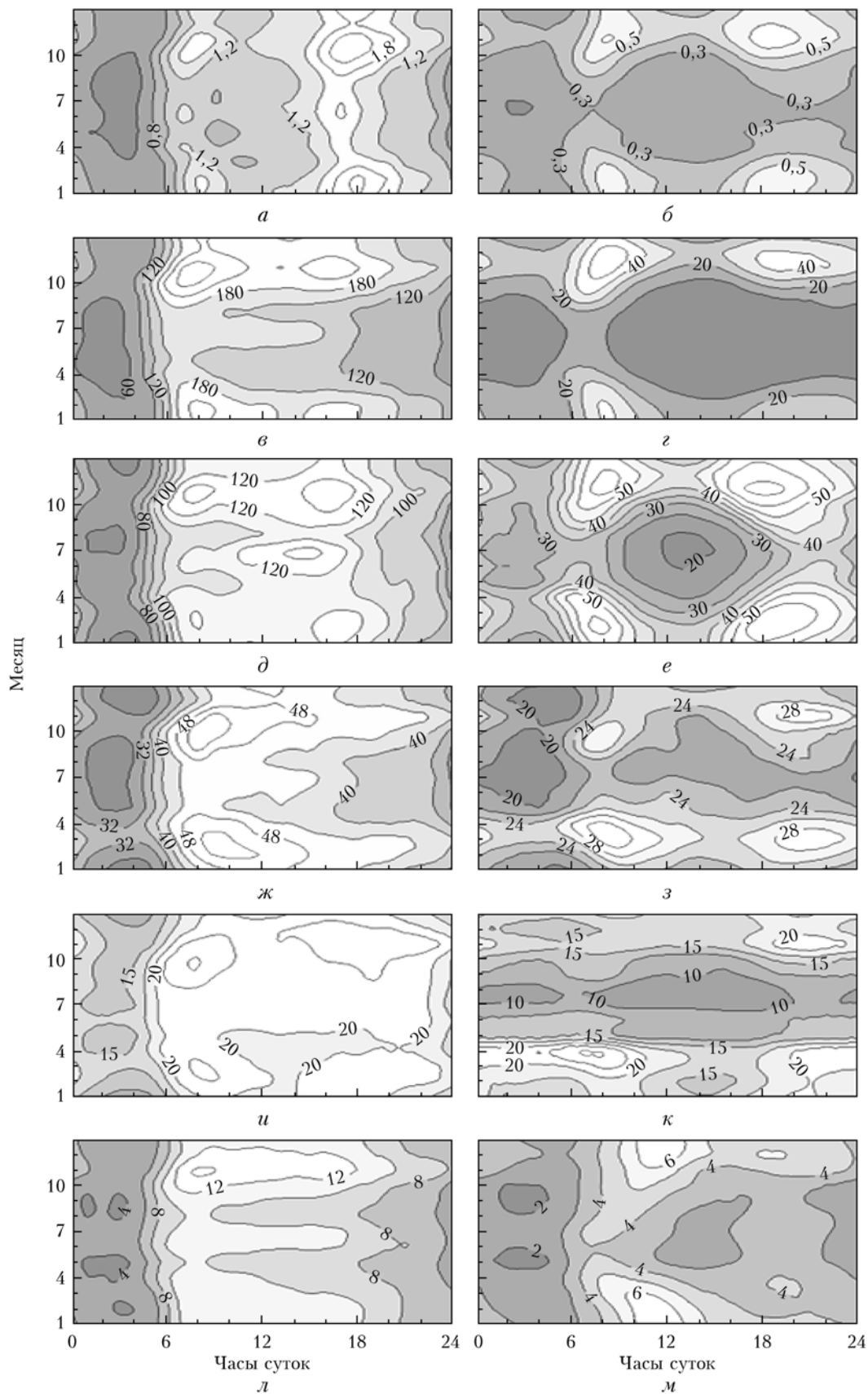


Рис. 2. Средняя многолетняя сезонно-суточная изменчивость CO (а, б), NO (в, г), NO₂ (д, е), PM₁₀ (ж, з), PM_{2.5} (и, к) и SO₂ (л, м) на станциях МР (а, в, д, ж, и, л) и СК (б, г, е, з, к, м) в Лондоне. Для CO концентрации в мг · м⁻³, для остальных компонентов – в мкг · м⁻³

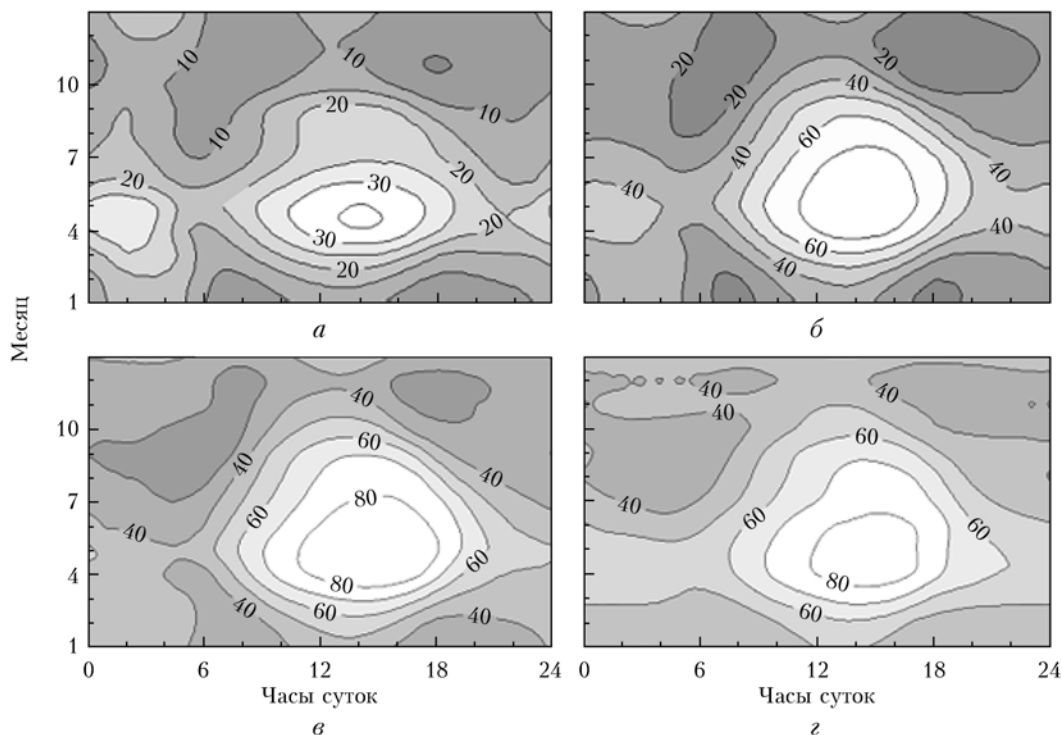


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для озона ($\mu\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$) на городских станциях МР (а) и СК (б), ст. Севенуокс в лесопарковой полосе Лондона (в) и сельской станции Харвелл (г)

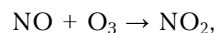
суточный и сезонный ходы CO наблюдаются и на станциях Лондона (см. рис. 2), причем если на ст. СК концентрации CO в 2,5–4 раза превышают концентрации в фоновых регионах мира, то на ст. МР – более чем на порядок.

В суточном ходе CO наименьшие концентрации имеют место ночью, в период наименьших выбросов. После утреннего пика концентрации CO , вызванного, несомненно, увеличением дорожного движения, днем наблюдается локальный минимум концентрации CO , обусловленный усилением интенсивности вертикального перемешивания, приводящим к рассеянию CO вверх. Уменьшение интенсивности вертикального перемешивания после полудня приводит к вечернему пику концентрации CO , спад которого связан с уменьшением объема выбросов с наступлением ночи. На обеих станциях вечерний пик CO выше, чем утренний.

В сезонном ходе CO в любое время суток максимум наблюдается в холодный сезон, минимум – в теплый. Это, очевидно, связано с сезонными условиями термического и динамического перемешивания: в теплый сезон, хотя в среднем уменьшается скорость переноса в пограничном слое атмосферы, слой перемешивания увеличивается до 1–2 км. Также с суточным ходом вертикального градиента температуры, по-видимому, связано и смещение летом времени наступления утреннего максимума концентрации CO к более ранним часам, а вечернего – ближе к ночи.

Суточный и сезонный ходы концентраций SO_2 и CO имеют, в основном, одинаковые закономерности, которые контролируются временной изменчивостью источников эмиссий и перемешиванием в городском пограничном слое. Из различий можно отметить, что утренний пик SO_2 выше вечернего.

При рассмотрении временного хода окислов азота, NO и NO_2 следует учитывать, что в антропогенных выбросах кроме CO из оксидов азота присутствует в основном NO , а NO_2 образуется в воздухе в результате реакции с озоном:



причем при обычно наблюдаемых в городской среде концентрациях реагирующих компонентов равновесие устанавливается за несколько минут [13, 14]. Поэтому NO и NO_2 в сумме рассматривают как первичные загрязнители. Суточный и сезонный ход концентраций NO_x ($= \text{NO} + \text{NO}_2$) также близок к соответствующему ходу концентраций CO и обусловлен теми же физическими процессами. Небольшой минимум в сезонном ходе NO_x в середине холодного периода, возможно, связан с ослаблением интенсивности движения автотранспорта в этот период. Различия в пиковых концентрациях NO_x между станциями СК и МР больше, чем для концентраций CO .

Суточный и сезонный ход концентраций PM_{10} и $\text{PM}_{2,5}$ типичен для мегаполисов [15] и близок к суточному и сезонному ходу концентраций NO_2 . Обращает на себя внимание, что в течение значительного времени года в ночные часы концентрации $\text{PM}_{2,5}$ на станциях СК и МР почти сравниваются.

Вышерассмотренные CO , SO_2 , NO и NO_2 являются первичными загрязнителями атмосферы, так как непосредственно выбрасываются транспортом, промышленными предприятиями, ТЭЦ. В отличие от них озон не выбрасывается в атмосферу и в повышенных, опасных для здоровья концентрациях образуется лишь в результате фотохимических

реакций в атмосфере, а потому считается вторичным загрязнителем.

Сравнение контурных сезонно-суточных диаграмм концентрации озона для ст. СК с аналогичными диаграммами для ст. Севеноукс (см. рис. 3), считающейся городской фоновой и расположенной в парковой зоне примерно в 40 км к юго-востоку от центра Лондона, и сельских станций Харвелл и Викен Фен показывает, что средние многолетние уровни озона на этих станциях в дневное время отличаются не более чем на $13 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$. Суточный и сезонный ход концентрации озона в Лондоне (см. рис. 3) типичен для городских станций [12, 16, 17]. В суточном ходе отчетливо проявляются два максимума: ночной (через 2–3 ч после полуночи) и дневной (через 2–3 ч после полудня). В холодный сезон величины дневного и ночного максимумов сравниваются, в теплый сезон дневной максимум существенно выше ночного (рис. 3 и 4).

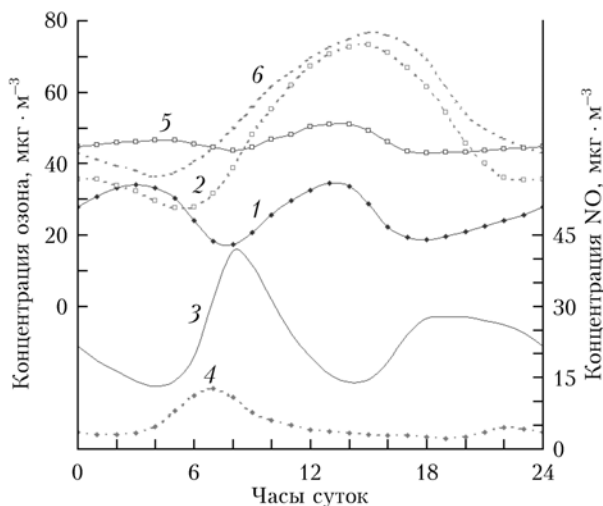


Рис. 4. Средний суточный ход на ст. СК концентрации озона в январе (1) и июле (2), NO в январе (3) и июле (4), а также концентрации озона на ст. Харвелл в январе (5) и июле (6)

Как показано в [12] и подтверждается рис. 4, ночной максимум озона в городах обусловлен повышенным разрушением озона в утренние и вечерние часы в результате его взаимодействия с NO, который имеет суточные максимумы в указанные часы (в основном связанные с выбросами от автотранспорта), ночью такие эмиссии значительно слабее.

Поскольку в тропосфере отношение смеси озона монотонно увеличивается с высотой, причем наиболее сильно в пограничном слое [18–20], то дневное усиление вертикального перемешивания при нагреве земной поверхности приводит к появлению дневного максимума в суточном ходе озона — на это указывает совпадение сроков наступления максимумов озона и температуры. Появлению дневного максимума озона способствует и его фотохимическая генерация. Сезонный максимум озона наблюдается в теплый период года — с апреля по август (в различные годы по-разному); минимум наблюдается в конце осени — начале зимы.

Антропогенные эмиссии на городских придорожных станциях Лондона, прежде всего NO, приводят к тому, что в течение всего года концентрации озона здесь в 2–4 раза ниже, чем на городской фоновой станции СК. Следует также отметить, что на городской фоновой станции Севеноукс и лежащих на расстоянии около 100 км от Лондона сельских станциях Харвелл, Викен Фен и ст. Луллингтон Хис, расположенной на $50^{\circ}48'$ с.ш., $0^{\circ}11'$ в.д., 120 м над ур.м., максимальные уровни озона в летний период на 5–15% превышают соответствующие уровни на станции СК.

Недельная изменчивость загрязнителей воздуха

Как и в других крупных городах мира, в изменчивости малых газовых составляющих атмосферы (МГСА) и аэрозолей в Лондоне проявляется недельный ход, так называемый «эффект выходного дня» [21–23]. Эффект наблюдается во все сезоны, отчетливо проявляется на всех станциях наблюдений и проиллюстрирован суточным ходом первичного (NO) и вторичного (озон) загрязнителей в холодный и теплый сезоны (рис. 5 и 6).

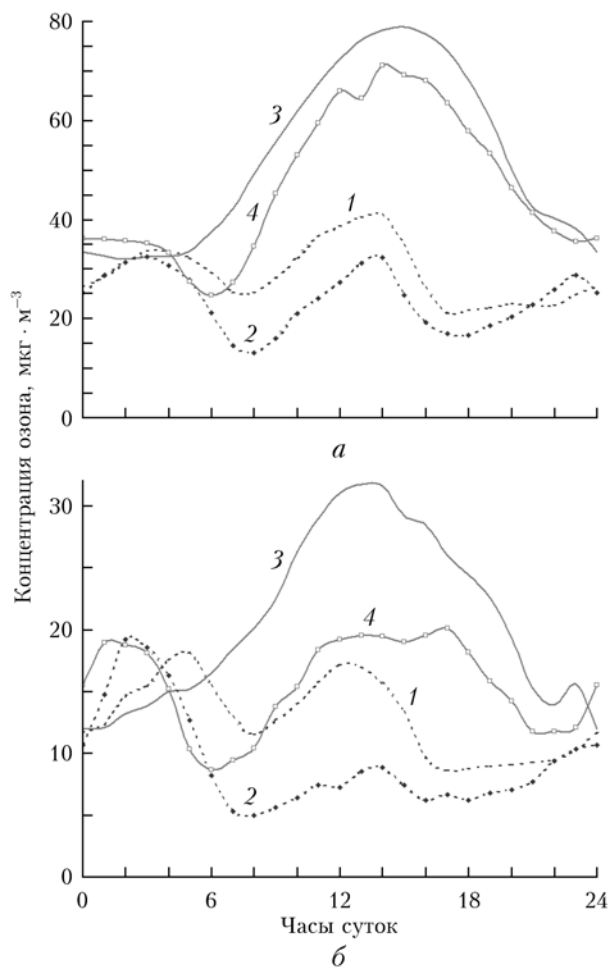


Рис. 5. Средний многолетний суточный ход концентрации озона на станциях СК (а) и МР (б) в январе по воскресеньям (1) и средам (2), а также в июле по воскресеньям (3) и средам (4)

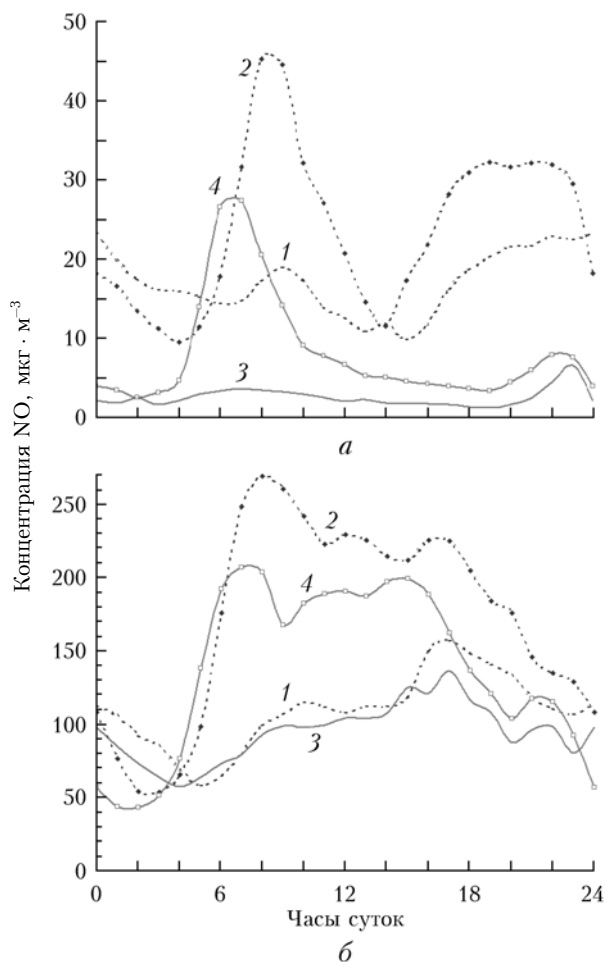


Рис. 6. Средний многолетний суточный ход концентрации NO на станциях СК (а) и МР (б) в январе по воскресеньям (1) и средам (2), а также в июле по воскресеньям (3) и средам (4)

По воскресеньям на придорожной станции МР в течение практически всех суток и в январе, и в июле концентрации NO на 20–30% ниже, чем соответствующие концентрации в будние дни; на городской фоновой станции СК различие еще большее — до 1,5–2 раз. Для озона, наоборот, в воскресенье максимальные дневные (через 1–3 ч после полудня) кон-

центрации выше, чем в будни: около 12% на станции СК и около 40% на станции МР (в концентрациях различие почти одинаково). То же соотношение в воскресенье и в часы, когда концентрации первичных загрязнителей имеют максимумы в суточном ходе: около 7 и 19 ч. Лишь в начале ночи (около 2 ч) в воскресенье концентрации озона заметно ниже, чем в будни. По всей видимости, это объясняется тем, что в начале ночи на воскресенье автомобильное движение гораздо оживленнее, чем в это же время суток в будни. В целом зависимость хода концентраций загрязнителей воздуха от дней недели в Лондоне такая же, как и в других крупных городах мира [21–25].

Эпизоды с высоким уровнем загрязнений воздуха

Критические концентрации различных загрязнителей воздуха в Великобритании, которые считаются опасными для здоровья, приведены в табл. 1 [26]. Они соответствуют нормативам, принятым в Европейском Союзе; по озону и CO они более мягкие, чем в России, но по PM₁₀ они гораздо жестче [27].

За период с 2002 по 2012 г., согласно данным, размещенным на сайте <http://www.londonair.org.uk>, в Лондоне зарегистрировано 78 эпизодов с высоким уровнем загрязнения воздуха. Эти эпизоды характеризуются концентрациями загрязнителей атмосферы выше критических (одно вещество или более), которые наблюдаются одновременно (в течение суток) на нескольких станциях. Так, превышение критических концентраций для PM₁₀ наблюдалось в 66 случаях, PM_{2,5} — в восьми (следует отметить, что эти измерения стали проводить лишь в последние 3–4 года, причем на существенно меньшем числе станций, чем PM₁₀), озона — в пятнадцати, NO₂ — в десяти, SO₂ — в четырех. В 19 эпизодах наблюдался смог; при этом концентрации PM₁₀ практически всегда превышали критические концентрации. Превышение критических концентраций NO₂ и SO₂ всегда наблюдалось во время эпизодов с превышением по PM₁₀; иначе говоря, лишь превышение критических концентраций по PM₁₀ и озону было независимым. Десять эпизодов связаны с праздниками (Ночь Гая Фокса, Дивали и др.), три — с крупными пожарами.

Таблица 1

Предельно допустимые концентрации (мкг · м⁻³) различных загрязнителей воздуха в Великобритании [26]. Цифры в скобках указывают максимальное число дней в году, когда могут иметь место превышения

Загрязнитель	Среднее				Порог для объявления тревоги — время усреднения
	за 1 ч	за 8 ч	за 24 ч	за 1 год	
Озон	—	120 (25)	—	—	180/240* — 1 ч
NO ₂	200 (18)	—	—	40	400 — 3 ч
CO	—	10000	—	—	—
SO ₂	350 (24)	—	125 (3)	—	500 — 3 ч
PM _{2,5}	—	—	—	25	—
PM ₁₀	—	—	50 (35)	40	—

* Для озона 180 мкг · м⁻³ — информационный порог, 240 мкг · м⁻³ — порог для объявления тревоги.

Изменчивость концентраций основных загрязнителей воздуха в Лондоне

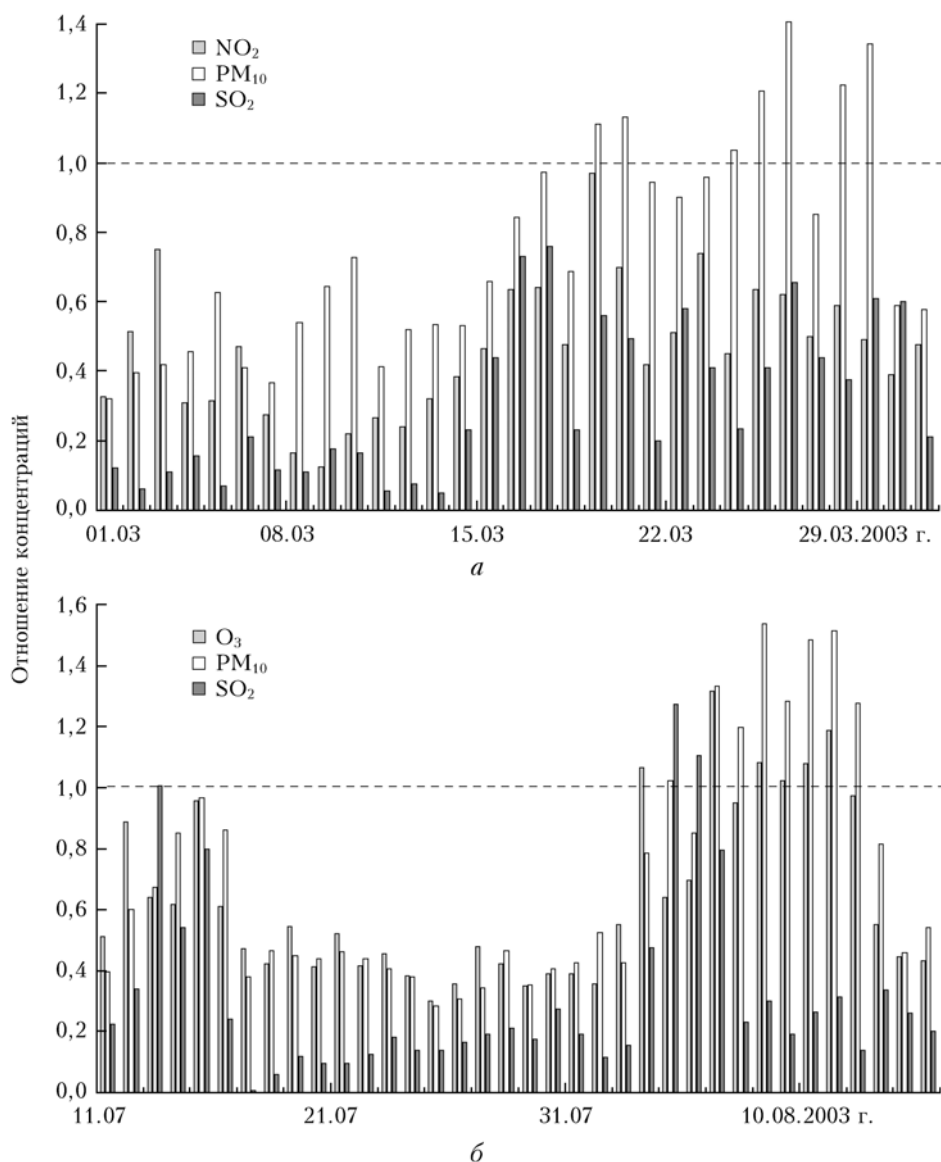


Рис. 7. Отношения концентраций различных загрязнителей атмосферы к ПДК летом 2003 г. на ст. СК: эпизоды 17–30 марта (а), 15–17 июля и 6–13 августа (б)

На рис. 7 приведены суточные отношения концентраций некоторых загрязнителей к их критическим уровням для двух эпизодов 2003 г. В качестве критических уровней в соответствии с нормативами Европейского Союза приняты следующие концентрации: по PM_{10} – $50 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ для среднего за 24 ч, по озону – $180 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ и по NO_2 – $200 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ для среднего за 1 ч, по SO_2 – $20 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ для среднего за 24 ч. Эпизод 17–30 марта 2003 г. характеризовался длительной смоговой ситуацией с превышением критических концентраций по PM_{10} , NO_2 и SO_2 . В эпизодах 15–17 июля и особенно 6–13 августа 2003 г. наблюдались самые высокие концентрации озона за все время наблюдений; также были превышены критические концентрации по PM_{10} и местами по SO_2 . По оценкам [28], в результате последнего эпизода в целом по Англии и Уэльсу только от вы-

соких уровней PM_{10} и озона могло произойти от 420 до 770 преждевременных смертей.

Зависимость сезонного хода концентраций озона от направления переноса воздушных масс в пограничном слое атмосферы

Ранее было показано, что концентрации озона в сильной степени зависят от направления переноса в пограничном слое атмосферы [9, 10]. На рис. 8 представлены оценки сезонного хода концентрации озона при различных направлениях переноса.

Следует отметить, что точки отсутствуют в дни, когда направление переноса не было постоянным

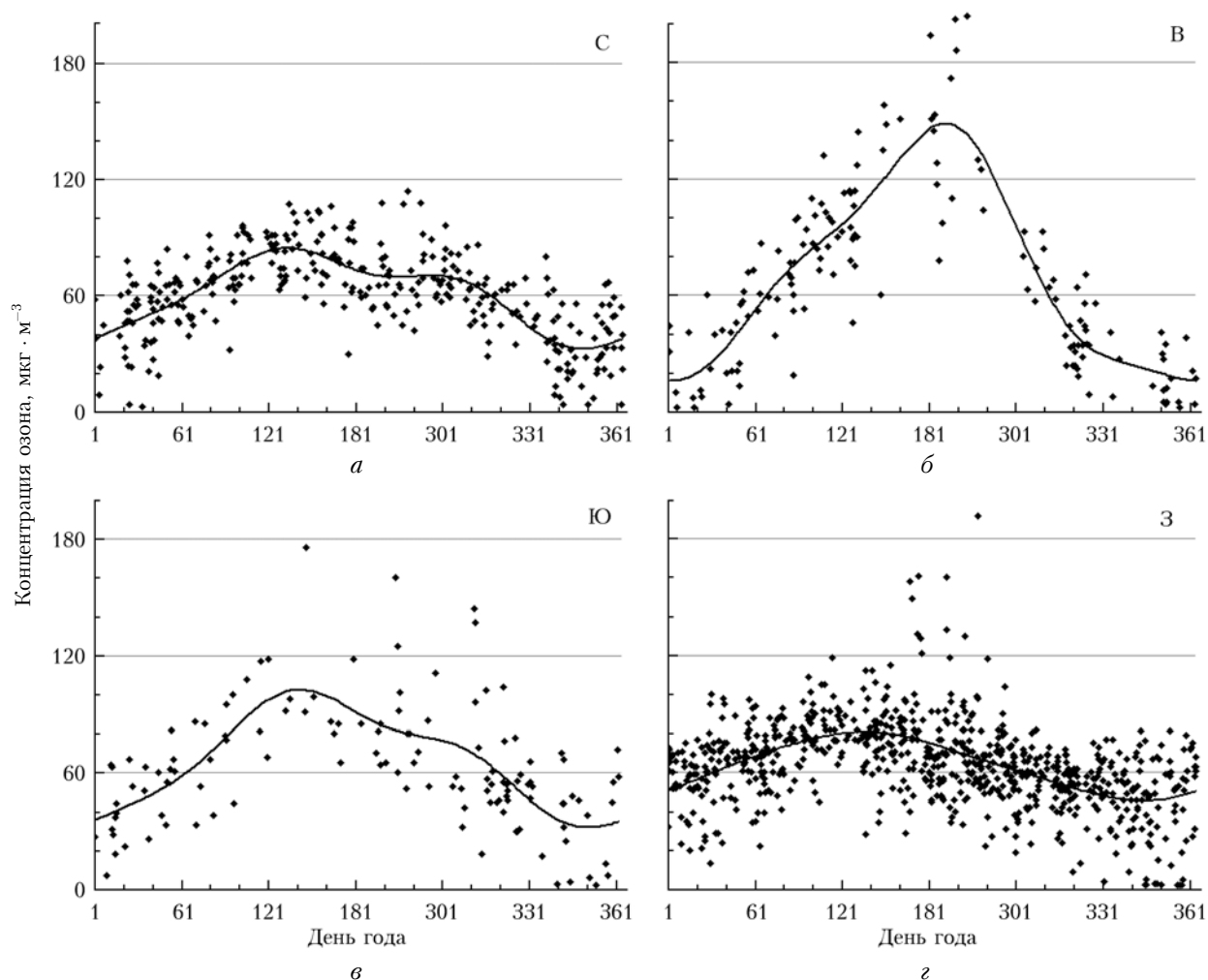


Рис. 8. Сезонный ход максимальных суточных концентраций озона в зависимости от направления переноса в пограничном слое атмосферы: северное (а), восточное (б), южное (в) и западное (г)

(таких дней было около 40%). При разделении всех направлений на 8 румбов наименее статистически обеспеченным оказался восточный перенос (повторяемость около 5%), наиболее обеспеченным – западный (повторяемость около 32%). Оценки сезонного хода концентрации озона получены с использованием первых трех гармоник годового хода по методу наименьших квадратов [10]. Из рис. 8 видно, что при восточном направлении переноса максимум сезонного хода озона наблюдается во второй половине лета, тогда как при других направлениях – в конце весны – начале лета. Аналогичная зависимость времени наступления сезонного максимума озона от направления переноса воздушных масс наблюдается и в других регионах Европы [10].

Что касается долговременных изменений концентраций загрязнителей атмосферы, то в целом уровень первичных загрязнений в Лондоне за период 2000–2012 гг. заметно уменьшился, а озона увеличился (рис. 9).

Концентрации NO_2 , CO , SO_2 и PM_{10} на различных станциях понизились примерно на 10, 25–70, 50–60 и 10% соответственно, концентрации озона

возросли примерно на 10%. Причем эти тенденции наблюдаются на всех типах станций атмосферного мониторинга.

Сравнение уровней загрязнения в Лондоне и Москве

Обобщенные данные сравнения уровня загрязнений в Лондоне и Москве приведены в табл. 2.

Видно, что по отношению к станции ИФА РАН–МГУ уровень первичных загрязнителей на городской фоновой станции СК в Лондоне немного ниже, а озона – немного выше; для наиболее «грязной» придорожной станции Лондона МР соотношение противоположное. На станции МР концентрации NO_2 и CO в течение всего года в 2–4 раза выше, чем на ст. СК. Однако на большинстве станций в Москве [5, 29] концентрации CO заметно превышают соответствующие концентрации для ст. МР в Лондоне и лишь немного ниже российской гигиенической нормы.

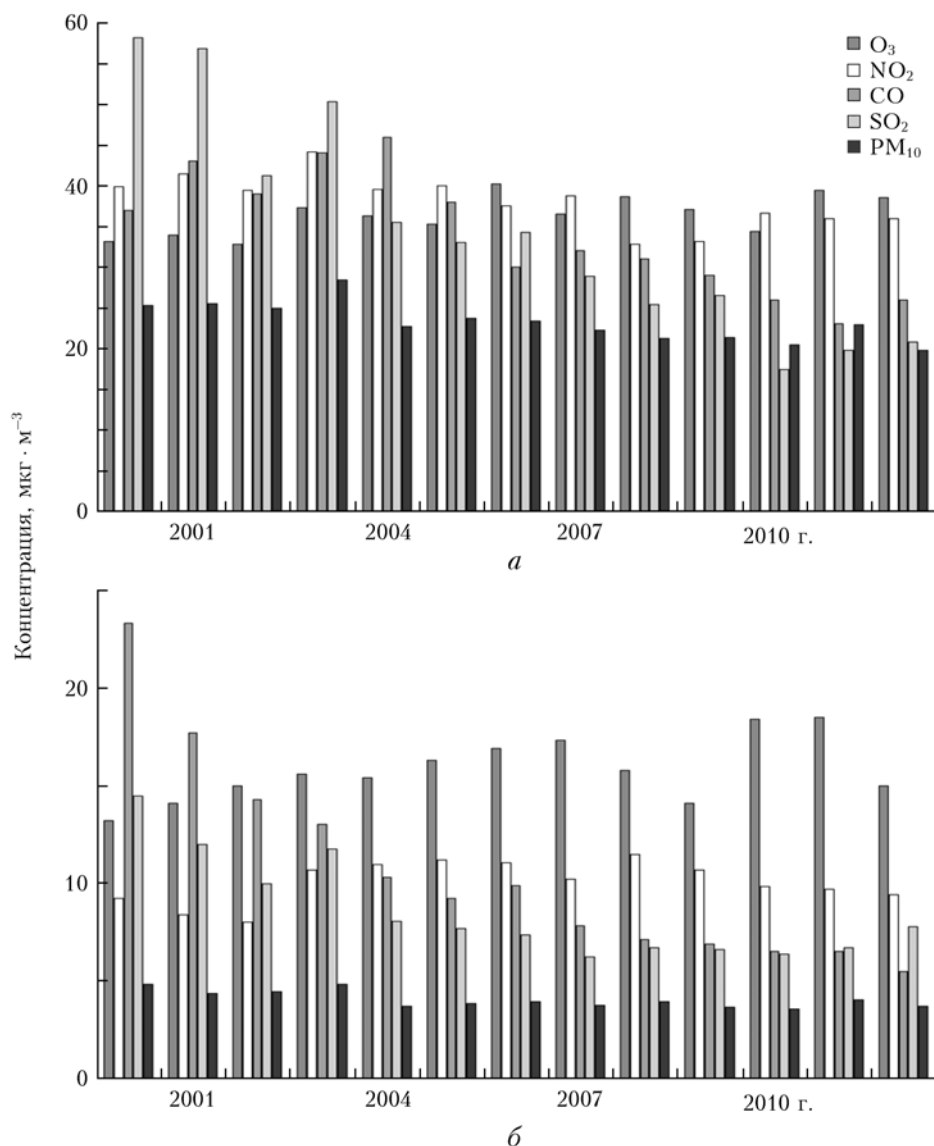


Рис. 9. Ход среднегодовых концентраций озона, NO_2 (δ – деленные на 10), CO (a – деленные на 10, δ – деленные на 100), SO_2 (a – умноженные на 10) и PM_{10} (δ – деленные на 10) на станциях СК (a) и МР (δ)

Таблица 2

Минимальные и максимальные среднесесячные концентрации различных загрязнителей воздуха в Лондоне и Москве, $\text{мкг} \cdot \text{м}^{-3}$

Загрязнитель	Минимальная и максимальная среднесесячная концентрация для станции			
	СК, Лондон	МР, Лондон	ГПУ «Мосэкомониторинг» [5, 29]	ИФА РАН – МГУ [6]
Озон	20–56	8–27	–	15–40
NO_2	28–48	93–110	20–120	30–50
CO	240–470	1000–1280	660–3950	550–850
SO_2	2,9–4,6	7,4–10,5	–	3–5
$\text{PM}_{2,5}$	9,4–20,7	17,7–21,4	–	–
PM_{10}	20,6–27,4	38,2–43,7	36–49	–

Заключение

На основе 12-летних данных исследована периодическая изменчивость МГСА (CO , $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$, SO_2 , озон) и аэрозолей на различных станциях мони-

торинга качества воздуха в Лондоне. Кроме сезонной и суточной изменчивости, характерной для МГСА в фоновых районах, выявлена их недельная изменчивость, связанная с временной динамикой объема антропогенных выбросов. Наименьшие концентрации

первичных загрязнителей воздуха (CO, NO_x, SO₂) и аэрозолей, а также наибольшие концентрации вторичного загрязнителя (озона) наблюдаются в выходные дни.

Пространственное распределение концентраций МГСА и аэрозолей в атмосфере над территорией Лондона характеризуется значительной неоднородностью. Концентрации первичных загрязнителей, в первую очередь монооксида азота, в близкорасположенных (~ 1 км) пунктах наблюдений могут различаться до десятков раз, концентрации вторичного загрязнителя – озона – до 2 раз. Пониженные концентрации озона наблюдаются в районах с более высокими уровнями первичных загрязнителей воздуха.

В суточной изменчивости озона отчетливо проявляются два максимума – дневной и ночной. Дневной максимум, наблюдаемый через 2–4 ч после местного полудня практически синхронно с максимумом температуры, характерен для всех равнинных (до 1000 м над ур.м.) пунктов наблюдений приземного озона и обусловлен как повышенным днем вертикальным перемешиванием, так и фотохимической генерацией озона. Ночной максимум образуется вследствие интенсивного разрушения озона антропогенными выбросами в вечерние и утренние часы и значительного ослабления такого разрушения ночью.

Суточные изменчивости концентраций всех первичных загрязнителей атмосферы и аэрозолей качественно похожи и характеризуются двумя максимумами в утренние и вечерние часы и двумя минимумами между ними. Ночной минимум, очевидно, связан с уменьшением антропогенных выбросов, дневной – с усиленным вертикальным перемешиванием в наиболее теплые часы суток. Утренний максимум связан с увеличением интенсивности антропогенных эмиссий, вечерний – с увеличением стабильности атмосферы при сохранении высокого уровня антропогенных эмиссий.

Наибольшие концентрации озона наблюдаются в теплый период года, вторичных загрязнений – в холодный. Небольшое понижение концентраций некоторых первичных загрязнителей воздуха в зимний период, возможно, связано с их вымыванием осадками и/или усилением скорости ветра в этот период.

Противоположный ход концентраций озона и других МГСА, а также аэрозолей в светлое время суток как в суточном, так и в годовом ходе указывает, что основной причиной их периодической изменчивости является вертикальное перемешивание.

Концентрации озона, по-видимому, слабо возрастают с годами, CO и SO₂ заметно, а NO_x и PM₁₀ не столь значительно уменьшаются.

Авторы благодарны группе исследований состояния окружающей среды Лондонского королевского колледжа (The Environmental Research Group, King's College London) за предоставленные данные наблюдений в открытом доступе.

Работа выполнена при частичной поддержке проектов РФФИ № 11-05-01144-а и 11-05-91061-НЦНИ_а.

1. *Atlas of health and climate*. World Health Organization and World Meteorological Organization. Geneva: WHO Press, 2012. 64 p.

2. *Mage D., Ozolins G., Peterson P., Webster A., Orthofer R., Vandeweerd V., Gawynne M.* Urban air pollution in megacities of the world // *Atmos. Environ.* 1996. V. 30, N 5. P. 681–686.
3. *Molina M.J., Molina L.T.* Megacities and atmospheric pollution // *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 2004. V. 54, N 6. P. 644–680.
4. *Доклад* о состоянии окружающей среды в городе Москве в 2012 г. М.: Мосэкомониторинг, 2013. 180 с.
5. *Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Зоткин Е.В., Карпов А.В., Лезина Е.А., Ульяненко А.В.* Вариации газовых компонент загрязнения в воздушном бассейне г. Москвы // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2006. Т. 42, № 2. С. 176–190.
6. *Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Беликов И.Б., Скороход А.И., Шумский Р.А.* Закономерности изменчивости концентраций малых газовых составляющих в приземном воздухе г. Москвы // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2007. Т. 43, № 2. С. 219–231.
7. *Звягинцев А.М., Беликов И.Б., Еланский Н.Ф., Кузнецова И.Н., Романюк Я.О., Сосонкин М.Г., Тарасова О.А.* Изменчивость концентраций приземного озона в Москве и Киеве // *Метеорол. и гидрол.* 2010. № 12. С. 26–35.
8. *Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.1338-03* «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест».
9. *Solberg S., Stordal F., Hov O.* Tropospheric ozone at high latitudes in clean and polluted air masses, a climatological study // *J. Atmos. Chem.* 1997. V. 28, N 1–3. P. 111–113.
10. *Звягинцев А.М., Какаджанова Г., Тарасова О.А.* Влияние направлений переноса на сезонный ход концентраций малых газовых составляющих атмосферы в Европе // *Метеорол. и гидрол.* 2010. № 7. С. 18–28.
11. *Tarasova O.A., Brenninkmeijer C.A.M., Joeckel P., Zvyagintsev A.M., Kuznetsov G.I.* A climatology of surface ozone in the extra tropics: cluster analysis of observations and model results // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7, N 24. P. 6099–6117.
12. *Звягинцев А.М., Какаджанова Г., Тарасова О.А.* Изменчивость приземного озона и других малых газовых составляющих атмосферы в мегаполисе и сельской местности // *Оптика атмосфер. и океана.* 2010. Т. 23, № 1. С. 32–37.
13. *Seinfeld J.H., Pandis S.N.* Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. New York: John Wiley & Sons, Inc. Second Edition, 2006. 1225 p.
14. *Батчер С., Чарлсон Р.* Введение в химию атмосферы. М.: Мир, 1977. 270 с.
15. *Глазкова А.А., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Семутникова Е.Г.* Суточный ход концентрации аэрозоля (PM₁₀) летом в Московском регионе // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 6. С. 495–500.
16. *Transboundary air pollution: Acidification, eutrophication and ground-level ozone in UK (NEGTAР 2001).* Edinburgh: CEH, 2001. 314 p.
17. *Селегей Т.С., Филоненко Н.Н., Ленковская Т.Н.* Оценка загрязнения атмосферного воздуха г. Новосибирска приземным озоном // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 2. С. 171–174.
18. *Бритаев А.С., Фарафонова Г.П.* Особенности распределения концентрации озона в г. Москве // *Атмосферный озон: Труды VI Всесоюз. симпози.* Л.: Гидрометеопиздат, 1987. С. 130–134.
19. *Aneja V.P., Mathur R., Arya S.P., Li Y., Murray G.C., Jr., Manuszak T.L.* Coupling the vertical distribution of ozone in the atmospheric boundary layer // *Environ. Sci. Technol.* 2000. V. 34, N 11. P. 2324–2329.

20. Звягинцев А.М. Аномалии приземного озона в Европе // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2004. Т. 40, № 3. С. 387–396.
21. Cleveland W.S., Graedel T.E., Kleiner B., Warner J.L. Sunday and workday variations in photochemical air pollutants in New Jersey and New York // Science. 1974. V. 186, N 4168. P. 1037–1038.
22. Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Карпов А.В., Колесникова А.Б., Байкова Е.С., Задорожная О.С. Недельный цикл загрязнения воздуха в г. Москве: количественные характеристики и уточнение методики статистического прогноза концентраций примесей // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 9. С. 784–792.
23. Melkonyan A., Kuttler W. Long-term analysis of NO, NO₂, and O₃ concentrations in North Rhine–Westphalia, Germany // Atmos. Environ. 2012. V. 60. P. 316–326.
24. Груздев А.Н., Исаков А.А., Елохов А.С. Анализ недельной цикличности приземного аэрозоля и NO₂ на Звенигородской научной станции ИФА РАН // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 10. С. 884–889.
25. 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.
26. UK. The Air Quality Standards Regulations 2010. N 1001. 22 p.
27. Звягинцев А.М., Блюм О.Б., Глазкова А.А., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Миллер Е.А., Миляев В.А., Попиков А.П., Семутникова Е.Г., Тарасова О.А., Шалыгина И.Ю. Аномалии концентраций малых газовых составляющих в воздухе европейской части России и Украины летом 2010 г. // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 7. С. 582–588.
28. Stedman J.R. The predicted number of air pollution related deaths in the UK during the August 2003 heatwave // Atmos. Environ. 2004. V. 38, N 8. P. 1087–1090.
29. WMO/IGAC. GAW Report N 205. Impacts of Megacities on Air Pollution and Climate. Geneva: WMO, 2012. 314 p.

A.M. Zvyagintsev, I.N. Kuznetsova, O.A. Tarasova, I.Yu. Shalygina. Variability of concentrations of main pollutants in London.

The main features of periodic and long-term variability of concentrations of ozone and other pollutants (nitrogen oxides NO_x, carbon monoxide CO, sulfur dioxide SO₂, particulate matters PM₁₀ and PM_{2.5}) in London for 2000–2012 are determined. The level of pollution in London is comparable with that in Moscow. The secondary pollutant (ozone) displays a seasonal variation with a maximum in spring-summer. All primary pollutants (other pollutants) reach the maximum in winter and the minimum in summer. During daytime, diurnal variations of primary and secondary pollutants are opposite, it is seen most clearly in summer. This fact shows the main role of vertical mixing in diurnal and seasonal variability of concentrations of all these pollutants. Weekday-weekend effect is observed for all pollutants. Some statistics of pollution episodes is presented. Concentrations of primary pollutants during 2000–2012 rather decreased, especially for SO₂ and CO; ozone concentration sooner slightly increased.