

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-3-122-135>

УДК 504.3.054

Исследование сезонной и суточной изменчивости концентраций приземного озона

Д.В. Борисов¹, И.Ю. Шалыгина¹, Е.А. Лезина²

¹ *Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

² *ГПБУ «Мосэкомониторинг», г. Москва, Россия
lby23.98@mail.ru*

Представлены результаты сравнения сезонной и суточной изменчивости приземного озона (O₃) и диоксида азота (NO₂) на городских станциях мониторинга в городах Москва (ГПБУ «Мосэкомониторинг»), Берлин и Варшава (European Environment Agency) за 2017–2018 гг. Данные наблюдений свидетельствуют о ведущей роли вертикального перемешивания воздуха в пограничном слое атмосферы в формировании сезонного и суточного режима приземного озона. Как сезонный, так и суточный ход O₃ и NO₂ хорошо согласуется на всех станциях. В теплый сезон определяющим в формировании суточного максимума и повышенных уровней приземного озона становится антропогенный фактор при благоприятных для активных фотохимических процессов метеорологических условиях. Определена повторяемость случаев с высокими концентрациями озона и выполнен анализ эпизода опасного для здоровья населения содержания озона в воздухе.

Ключевые слова: метеорологические условия, приземный озон, сезонный ход, суточный ход, эпизоды высоких концентраций озона

Studying seasonal and daily variability of surface ozone

D.V. Borisov, I.Yu. Shalygina, E.A. Lezina

¹ *Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;*

² *Budgetary environmental protection institution
«MosEcoMonitoring», Moscow, Russia
lby23.98@mail.ru*

The results of the comparison of seasonal and daily variability of surface ozone (O₃) and nitrogen dioxide (NO₂) at urban monitoring stations in Moscow (Mosekomonitoring), Berlin, and Warsaw (European Environment Agency) for 2017-2018 are presented. Observational data indicate a leading role of vertical mixing in the atmospheric boundary layer in the formation of seasonal and daily regimes of surface ozone. Both seasonal and diurnal variations in O₃ and NO₂ are in good agreement at all stations. In the warm season, the anthropogenic factor becomes a key one for the formation of the daily maximum and increased levels of surface ozone under favorable meteorological conditions for active photochemical processes. The frequency of occurrence of high ozone values is determined, and an episode of atmospheric ozone values dangerous for public health is analyzed.

Keywords: meteorological conditions, surface ozone, seasonal variation, diurnal variation, episodes of high ozone values

Введение

В России мониторинг приземного озона ведется на ограниченной территории. Развитая сеть непрерывного мониторинга, аналогичная зарубежным системам, которые охватывают все европейские страны (<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps>), США, в России функционирует в двух городах – Москве (<https://mosecom.mos.ru/>) и Санкт-Петербурге (<http://www.infoeco.ru/index.php?id=53>). Непрерывные наблюдения за приземным озоном также проводятся на сети Росгидромета в городах Сочи, Казань, отдельных населенных пунктах Уральского и Забайкальского УГМС. В Апатитах (Мурманская обл.), Коктебеле (Крым), Вятских Полянах (Кировская обл.), Зотино (Красноярский край <http://www.zottoproject.org/index.php/Main/Home>) и Томске (<http://lor.iao.ru/>) работают фоновые станции нескольких научно-исследовательских институтов. Четыре станции фонового мониторинга программы ЕМЕР (European Monitoring and Evaluation Programme, Европейская программа мониторинга и оценки) действуют на Европейской территории России (<https://projects.nilu.no/ccn/network/index.html>) под патронажем ФГБУ «Институт глобального климата и экологии им. Ю.А. Израэля».

В [3] обсуждаются основные проблемы мониторинга приземного озона в России, а именно – актуальность мониторинга приземного озона в России и необходимость развития методов прогнозирования приземной концентрации озона, в том числе на основе химических транспортных моделей.

В результате разобщенности данные измерений приземного озона в России принадлежат разным организациям, что не позволяет организовать единый синхронизированный банк данных, как, например, в ЕЕА (European Environment Agency – Европейское агентство по окружающей среде) или ЕМЕР. Данные мониторинга Европейского центра ЕЕА (порядка 5 тыс. станций) находятся в открытом доступе. Доступность этих данных позволяет изучать короткопериодные и долгопериодные изменения концентраций загрязняющих примесей, включая приземный озон, выявлять условия, благоприятные для формирования экстремальных и опасных для здоровья человека концентраций, разрабатывать и тестировать новые методы прогноза загрязнения воздуха.

В мировой практике принято классифицировать станции мониторинга атмосферного воздуха на:

- равнинные (plain) и высокогорные (high-mountain) – выше 1000 м над у. м.);
- сельские или фоновые (rural) и городские (urban).

Городские станции подразделяются на:

- пригородные (suburban);
- жилые (urban);
- примагистральные (traffic).

В [4, 12]. анализируется различие суточного режима приземной концентрации озона на равнинных и высокогорных станциях, которое объясняется влиянием горно-долинной циркуляции на последних. В [5, 6] показано, что различия суточного режима приземного озона на фоновых и городских станциях обусловлены фотохимической генерацией озона в теплый сезон при дополнительных антропогенных источниках газов-предшественников. В [8] различия в суточном ходе приземного озона на пригородных и городских станциях (жилые, примагистральные) объясняются влиянием близко расположенных территорий с высоким уровнем техногенной нагрузки. В [6, 7] преобладание процессов деструкции озона вблизи источников (примагистральные станции) над процессами генерации на удалении от прямых источников выбросов (жилые станции) определяется различным уровнем антропогенной нагрузки в городе.

Наблюдаемые на территории России эпизоды с высокими концентрациями приземного озона [3] и недостаток отечественных данных определяют актуальность данного исследования и сравнения изменчивости концентраций приземного озона на немногочисленных российских станциях с аналогичными результатами на зарубежных станциях различного типа.

Ниже обсуждаются результаты анализа сезонного и суточного хода приземного озона и его предшественников (NO_2), наблюдавшихся в течение двух лет на городских станциях в Москве, Берлине и Варшаве, расположенных в схожих физико-географических условиях. Приводятся повторяемость случаев с высокими концентрациями озона и анализ эпизода опасного для здоровья населения содержания озона в воздухе.

Исходные данные

Использованы данные наблюдений диоксида азота (NO_2) и приземного озона (O_3) на трех указанных выше станциях мониторинга (табл. 1, <https://ru.climate-data.org/>). Пункты наблюдений в Берлине и Варшаве расположены в черте города, т. е. относятся к городским жилым и входят в сеть мониторинга Европейского агентства по окружающей среде (<https://www.eea.europa.eu>). Станция в Москве является частью сети ГПБУ «Мосэкомониторинг». Она расположена в районе площади Гагарина и относится к городским примагистральным. Станций одного типа во всех трех городах с репрезентативными рядами наблюдений по обоим газам за исследуемый период найти не удалось. Численность населения в выбранных столицах (табл. 1, <https://www.destatis.de>, <https://stat.gov.pl>, <https://www.gks.ru>) значительно различается, однако плотность (чел./км²) и количество автомобилей на душу населения – основного источника выбросов в этих городах, сопоставимы.

Сформирована база данных часовых наблюдений за два года: с января 2017 по ноябрь 2018 года (около 16 тыс. значений). По каждой станции был рассчитан средний суточный ход концентраций NO_2 и O_3 по месяцам

и таким образом получены средние арифметические значения концентраций за каждый определенный час конкретного месяца за два года (за исключением декабря 2018 г.). Сезонный ход рассчитан для каждой станции путем осреднения часовых концентраций по каждому месяцу, также за два года.

Таблица 1. Характеристики городов (станций мониторинга)
Table 1. Characteristics of the cities

Станция	Город (станция)		
	Москва (Площадь Гагарина)	Берлин (Berlin Wedding)	Варшава (Warszawa- Targówek)
Широта, с. ш.	55,71	52,54	55,29
Долгота, в. д.	37,58	13,34	21,04
Средняя годовая температура, °С	4,9	9,1	7,7
Годовая сумма осадков	674	570	501
Численность населения, млн	12,68	3,77	1,76
Плотность, чел. км ²	4950	4088	3461
Кол-во машин на 1 тыс. чел.	400	327	600

Сезонный ход

Основным естественным источником озона в приземном слое воздуха в течении всего года является его поступление из вышележащих слоев в результате стратосферно-тропосферного обмена [1, 11]. В теплое время года дополнительным источником приземного озона становится его образование в результате фотохимических реакций в присутствии в приземном воздухе достаточного количества газов-предшественников (NO_x, ЛОС – летучие органические соединения) антропогенного происхождения [1, 15]. Скорость фотохимических реакций зависит от температуры: чем выше температура, тем быстрее протекают реакции [13]. Обязательным условием для фотохимической генерации озона является присутствие в атмосфере окислов азота (NO и NO₂) [1]. Деструкция (сток) озона происходит на растительности, почвенном покрове и объектах инфраструктуры.

Выбранные для анализа станции расположены в умеренных широтах, но в разных климатических зонах (см. табл. 1). Средняя годовая температура в Берлине почти в два раза выше, чем в Москве, но с мая по август температура во всех трех столицах различается незначительно (рис. 1б).

Во все летние месяцы в Москве количество осадков больше, чем в других городах, т. е. в Москве климатические условия в теплый сезон менее благоприятны для фотохимической генерации озона, чем в Берлине и Варшаве. Вместе с тем в отдельные годы крупномасштабные атмосферные процессы могут способствовать установлению в теплый сезон длительного периода тихой, сухой и жаркой погоды, благоприятной для активной фотохимической генерации озона во всех трех столицах [7, 9, 16–19].

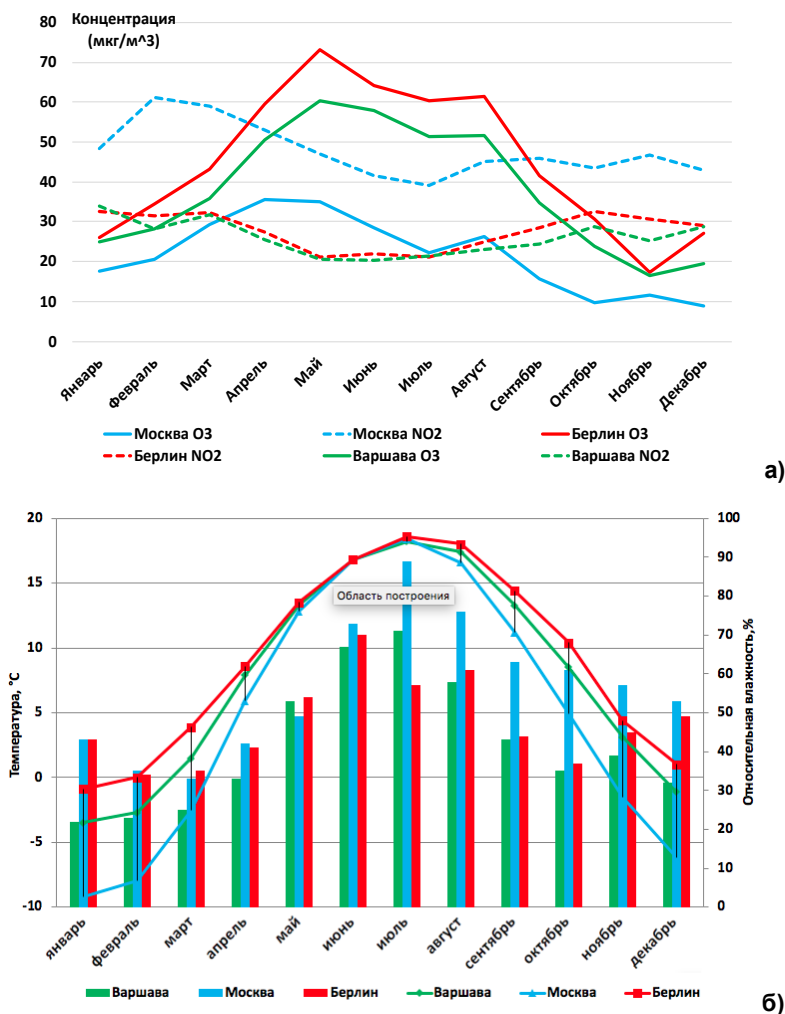


Рис. 1. Средние месячные концентрации O₃ и NO₂ (а); средние месячные значения температуры и относительной влажности воздуха (б).

Fig. 1. Monthly average concentrations of O₃ and NO₂ (a); monthly average values of temperature and relative humidity (б).

На рис. 1а представлены средние месячные значения концентраций O_3 и NO_2 в Москве, Берлине и Варшаве, их сезонный ход имеет классические черты озонового режима на равнинных станциях [4, 5]. Годовой максимум отмечается в весенние месяцы: в Москве это апрель, на станциях в Берлине и Варшаве – май. Второй менее выраженный максимум на всех трех станциях образуется чаще всего в июле–августе; он обусловлен фотохимической генерацией озона в приземном слое воздуха [10].

На станции в Москве, в отличие от станций в Берлине и Варшаве, концентрации озона на протяжении всего года меньше, а концентрации диоксида азота, напротив, больше. Очевидно, это связано с расположением рассматриваемой московской станции вблизи крупной автомагистрали. Вблизи прямых источников антропогенных выбросов процессы деструкции озона преобладают над процессами его фотохимической генерации. Подтверждением этого служит рассчитанная разность средней месячной концентрации озона между московской и европейскими станциями: в теплый сезон на приагостальной станции в Москве приземного озона на 35–40 $мкг\ м^{-3}$ меньше, чем в Берлине, и на 25–30 $мкг\ м^{-3}$ меньше по сравнению с Варшавой. В холодный сезон различия между московской и зарубежными станциями меньше и составляет 10–20 $мкг\ м^{-3}$. Подчеркнем, что различия между станциями в величинах средних месячных концентрациях NO_2 мало меняется от месяца к месяцу и составляет в среднем 18–20 $мкг\ м^{-3}$.

С октября по февраль на станции в Москве средняя месячная концентрация озона составляет 9–20 $мкг\ м^{-3}$; в марте она возрастает до 30 $мкг\ м^{-3}$. Главный максимум в годовом ходе приземного озона наблюдается в апреле–мае (рис. 1а).

На станции в Берлине с октября по февраль, как и в Москве, средние месячные концентрации озона меньше, чем в остальную часть года, и составляют 17–34 $мкг\ м^{-3}$; в марте среднемесячный уровень концентраций возрастает до 43 $мкг\ м^{-3}$. Максимум в сезонном ходе озона наблюдается в апреле–мае, средние концентрации в эти месяцы – 65–73 $мкг\ м^{-3}$. Второй максимум – 65 $мкг\ м^{-3}$, отмечается в августе.

На станции в Варшаве средние месячные значения концентрации озона в холодный сезон близки к значениям на станции в Берлине; в теплый сезон они на 10–12 $мкг\ м^{-3}$ меньше, чем в Берлине.

Отличительными чертами сезонного хода диоксида азота (см. рис. 1а) на всех станциях является годовой максимум в холодный сезон года и минимум – в теплый. Летний минимум обусловлен механизмом активного турбулентного перемешивания и выноса загрязняющих примесей из приземного слоя в вышележащие слои.

Средние месячные концентрации диоксида азота на станциях в Берлине и Варшаве отличаются мало – не более чем на 4–5 $мкг\ м^{-3}$ и составляют в холодный сезон на обеих станциях 28–32 $мкг\ м^{-3}$, в теплый сезон – около 20 $мкг\ м^{-3}$. На приагостальной станции в Москве средняя концентрация диоксида азота 43–61 $мкг\ м^{-3}$, в теплый сезон – 40–50 $мкг\ м^{-3}$.

Суточный ход

Суточный ход содержания озона и диоксида азота, так же как и сезонный, на рассматриваемых станциях во все сезоны отличается лишь значениями концентраций, временем наступления и продолжительностью суточных экстремумов (рис. 2).

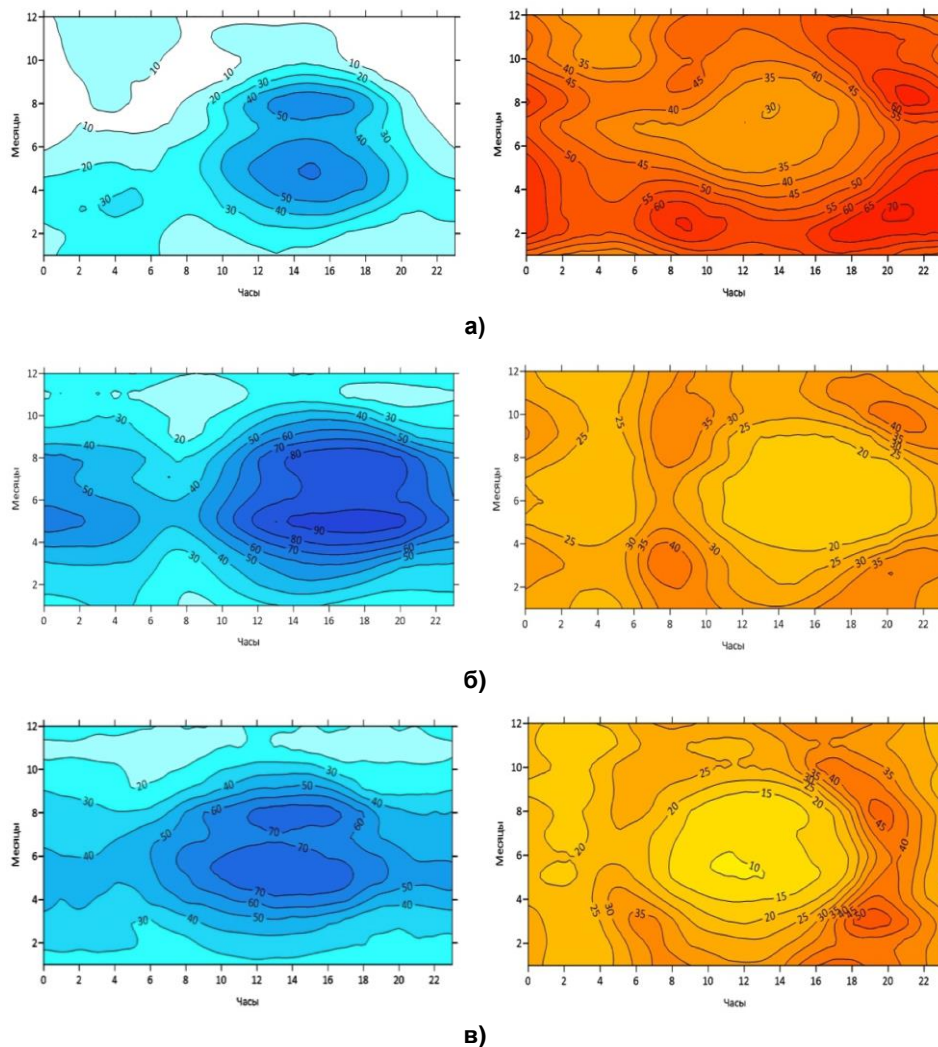


Рис. 2. Среднесуточный и сезонный ход концентраций О₃ (слева,) NO₂ (справа), мкг м⁻³, в Москве (а), Берлине (б), Варшаве (в), 2017-2018 гг.
Fig. 2. Changes in the daily average and season lvalues of O₃ (left), NO₂ (right) (μg m⁻³) in Moscow (above), Berlin (in the middle), Warsaw (below), 2017-2018.

Зимой суточный ход приземного озона на всех станциях характеризуется бимодальным распределением с максимумами в ночное и послеполуночное время. Утренний минимум O_3 в Варшаве наступает в более ранние часы (6–7 ч), чем на станциях в Москве и Берлине (8 ч), вечерний минимум на станциях в Москве и Берлине (20–22 ч) более растянут, чем в Варшаве (20 ч).

В суточном ходе концентраций диоксида азота на рассматриваемых станциях максимумы наблюдаются в утреннее и вечернее время, что совпадает с пиком транспортной нагрузки. Совпадение суточных максимумов NO_2 с минимумом O_3 объясняется тем, что озон участвует в реакциях образования диоксида азота. Суточный ход NO_2 зимой более сглаженный, чем в другие сезоны.

На станции в Берлине уже в феврале в суточном ходе O_3 начинают проявляться черты суточного хода теплого сезона с выраженным дневным максимумом (48 мкг м^{-3}). В феврале дневные температуры здесь в среднем положительные, устойчивый снежный покров отсутствует, поэтому в солнечные дни в дневные часы с прогревом подстилающей поверхности и усилением турбулентности увеличивается высота пограничного слоя и активизируются процессы фотохимической генерации озона. Эти процессы способствуют тому, что на станции в Берлине уже в феврале формируется заметный дневной максимум, в отличие от станций в Варшаве и Москве, где дневные температуры в феврале чаще всего еще отрицательные.

Весной для всех станций характерно появление выраженного дневного максимума содержания озона, связанного с увеличением интенсивности вертикального турбулентного обмена, увеличением продолжительности светового дня, повышением температуры, и, следовательно, активной фотохимической генерации озона. Суточный максимум в Москве формируется в основном в 12–18 ч, в Варшаве (11–17 ч) время в Берлине смещено на более позднее время (14–19 ч).

В суточном ходе диоксида азота вечерний максимум на станциях в Москве и Берлине весной смещается на 21 ч (зимой в 19 ч), на станции в Варшаве – на 19–20 ч. Смещение вечерних максимумов диоксида азота весной на более позднее время связана с увеличением продолжительности светового дня и периода активного вертикального турбулентного обмена.

Летом дневной максимум озона хорошо выражен на всех станциях; в Берлине, как и весной, он смещен на более поздние часы в сравнении с московской и варшавской станциями. От июня к августу вечерние максимумы диоксида азота на станциях в Москве и Берлине смещаются на более ранние часы.

Следует обратить внимание на то, что наибольшая разность концентраций озона на европейских и московской станциях в рассматриваемые годы наблюдалась в июле. При том, что в рассматриваемые годы имели

место значительные межгодовые отличия. Так, на станции в Берлине средняя концентрация O_3 в июле 2017 г. составила 49 мкг м^{-3} , а в июле 2018 г. – 71 мкг м^{-3} . Высокие средние месячные концентрации в июле 2018 г. на станциях в Берлине и Варшаве стали результатом преобладания аномальных метеорологических условий, благоприятных для активной фотохимической генерации приземного озона, здесь стояла жаркая и сухая погода. Средняя месячная температура воздуха в Варшаве и Берлине в июле 2018 г. оказалась, соответственно, на $3,3$ и $3,6$ °С выше климатической нормы (рис. 16). В Берлине в течение 10 дней дневная температура воздуха превышала 28 °С, в конце месяца в обеих столицах суточный максимум превысил 30 °С. Дожди выпадали в Берлине три дня, в Варшаве – восемь дней (<https://world-weather.ru>).

В июле 2017 г. средняя месячная температура в этих городах была близкой к норме, преобладала преимущественно облачная погода, число дней с осадками в Берлине было восемь, в Варшаве – 11.

Осенью суточный ход озона на всех станциях приобретает черты суточного хода холодного сезона: появляется ночной максимум, который от сентября к ноябрю выравнивается с дневным, время наступления дневного максимума озона смещается на более ранние часы. Вечерний максимум диоксида азота на всех станциях смещается на более ранние часы (на 19 ч на станциях в Москве и Берлине, на 17 ч – в Варшаве).

Проведенный анализ для городских станций подтвердил полученный ранее для сельских станций умеренных широт Северного полушария [5] вывод о ведущей роли вертикального перемешивания в пограничном слое атмосферы в формировании сезонного и суточного режимов приземного озона.

Эпизод повышенных концентраций озона в воздухе

С использованием российских и зарубежных (ВОЗ) гигиенических нормативов проведен анализ эпизодов повышенных концентраций приземного озона. За два года (2017–2018 гг.) повторяемость концентрации озона с превышением норматива ВОЗ (100 мкг м^{-3} в среднем за 8 ч) составила на станции в Москве менее 1 %, в Берлине – 4 %, Варшаве – 1 %.

Превышений российского норматива (160 мкг м^{-3} в среднем за 20–30 мин) в Москве не наблюдалось. На станции в Варшаве был один такой эпизод 5 июля 2018 г. На станции в Берлине было пять эпизодов, все летом 2018 года.

Подробно рассмотрен озоновый эпизод 5 июля 2018 года. В этот день на обеих зарубежных станциях были зафиксированы концентрации озона в воздухе, превышающие 160 мкг м^{-3} (рис. 3).

Анализ синоптических карт показал, что 5 июля Берлин и Варшава находились в теплом секторе на северной периферии обширного

антициклона с центром над Балканами. Ночью в обоих городах наблюдались приземные инверсии (<http://www.uwyo.edu>). Днем 5 июля в Берлине ветер в пограничном слое оставался слабым, относительная влажность воздуха составляла 24–31 %, осадков не было. Схожие синоптические условия наблюдались и в Варшаве, где влажность воздуха менялась от 26 до 39 %. Температура воздуха в обоих городах была около 30–31 °С (<http://worldweather.wmo.int/ru/home.html>).

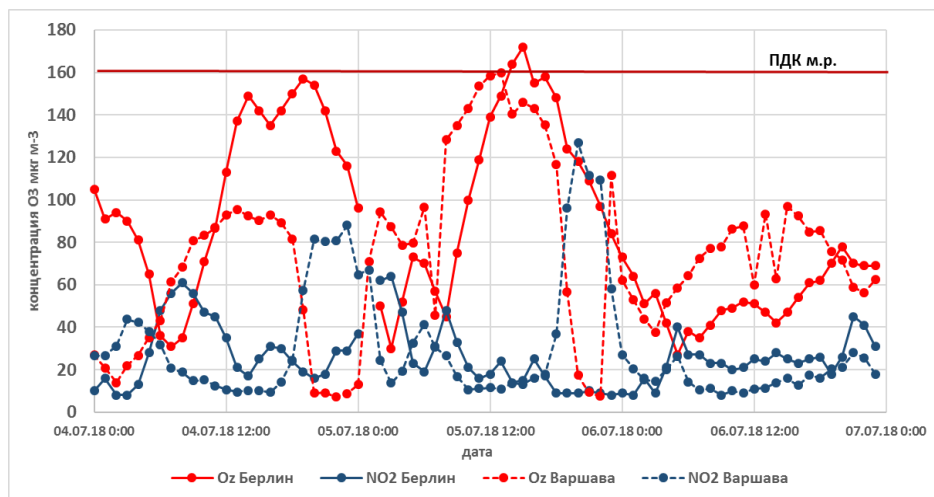


Рис. 3. Временной ход концентрации озона и диоксида азота в Берлине и Варшаве 4-6 июля 2018 г.

Fig. 3. Variability of ozone and nitrogen dioxide concentrations in Berlin and Warsaw during on July 4-6, 2018.

Примечательно, что в ночь на 5 июля в Варшаве был зарегистрирован рост концентрации озона. Траекторный анализ переноса воздушных масс (<https://www.arl.noaa.gov>) показал, что в Варшаву поступал воздух из Германии, где уже днем 4 июля на станции в Берлине наблюдались высокие концентрации озона. Эпизоды такого переноса воздушных масс, богатых озоном, наблюдались и ранее [4, 5, 8]. Максимальные концентрации озона 5 июля на станции в Берлине (172 мкг м^{-3}) отмечались в 15 ч местного времени, а в Варшаве (160 мкг м^{-3}) – в 13 ч.

Отметим, что в Берлине ясная погода сохранялась до вечера, а в Варшаве после 12 ч появилась облачность, что, видимо, и стало причиной раннего снижения концентраций озона. При слабом ветре в Варшаве в вечерние часы наблюдалась самая высокая за два рассматриваемых года концентрация NO_2 . Ночью 6 июля с приближением циклона и прохождением холодного атмосферного фронта эпизод повышения концентрации в обеих столицах завершился.

Описанный эпизод является примером наблюдающихся в европейских столицах и в Москве [9, 12, 16–19] эпизодов с высокими концентрациями озона, представляющими опасность для здоровья населения.

Заключение

Установлено, что в 2017–2018 гг. в Москве, Берлине и Варшаве сезонный ход приземного озона и диоксида азота хорошо согласуется и имеет классические черты сезонного хода на равнинных городских станциях. Годовой максимум, обусловленный активными процессами стратосферно-тропосферного обмена, приходится на весенние месяцы: на станции в Москве это апрель, а на станциях в Берлине и Варшаве – май. Второй, менее выраженный максимум на всех трех станциях наблюдается в августе и обусловлен фотохимической генерацией озона в приземном слое воздуха.

В годовом ходе концентрации диоксида азота на всех станциях максимум наблюдается в холодный сезон, минимум – в теплый. Летний минимум обусловлен механизмом активного турбулентного перемешивания и выноса из приземного слоя в вышележащие слои воздуха загрязняющих примесей. С ослаблением этих процессов в холодный сезон наблюдается максимум NO_2 на всех трех станциях.

Сезонный и суточный ход концентраций приземного озона и диоксида азота на всех станциях имеют общие черты. В холодный сезон различия между рассмотренными станциями незначительные. В теплый сезон суточные экстремумы концентраций приземного озона и диоксида азота на станциях отличаются значениями и временем их наступления.

За двухлетний период наблюдений повторяемость дней с повышенными и высокими концентрациями озона (более 100 мкг м^{-3} в среднем за 8 ч) на станциях в Москве и Варшаве составила около 1 %, в Берлине – 4 %. Превышений российского норматива (160 мкг м^{-3} в среднем за 20–30 мин) на примагистральной станции в Москве не наблюдалось, на станции в Варшаве был один такой эпизод, на станции в Берлине – пять (все летом 2018 г.). Озоновый эпизод в июле 2018 г. в Берлине и в Варшаве сформировался при благоприятных для активной фотохимической генерации озона в приземном слое воздуха метеорологических условиях и сопровождался значительной положительной аномалией температуры.

Список литературы

1. Белан Б.Д. Тропосферный озон. 2012. 560 с.
2. Грушко Я.М. Вредные неорганические соединения в промышленных выбросах в атмосферу: Справочник. Л.: Химия, 1987. 190 с.
3. Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Лезина Е.А., Лапченко В.А., Никифорова М.П., Демин В.И. Актуальность наблюдений

и прогноза приземного озона в России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2018. Т. 29, № 1. С. 89-106.

4. Звягинцев А.М. Основные периодичности временного хода приземного озона в Европе // Метеорология и гидрология. 2004. № 10. С. 46-55.

5. Звягинцев А.М., Г. Какаджанова, Г.М. Крученицкий, О.А. Тарасова. Периодическая изменчивость приземной концентрации озона в западной и центральной Европе по данным наблюдений // Метеорология и гидрология. 2008. № 3. С. 38-47.

6. Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Тарасова О.А., Шалыгина И.Ю. Изменчивость концентраций основных загрязнителей воздуха в Лондоне // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 5. С. 424-434.

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 // Метеорология и гидрология. 2010. № 12. С. 26-35.

8. Звягинцев А.М., Какаджанова Г.М., Тарасова О.А. Изменчивость приземного озона и других малых газовых составляющих атмосферы в мегаполисе и сельской местности // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23, № 1. С. 32-37.

9. Звягинцев А.М. Аномалии приземного озона в Европе // Известия РАН. ФАО. 2004. Т. 40, № 3. С. 387-396.

10. Звягинцев А.М. Пространственно-временная изменчивость озона в тропосфере: автореф. дисс. д-ра физ.-мат. наук. М., 2013. 48 с.

11. Хргиан А.Х., Перов С.П. Современные проблемы атмосферного озона. Л.: Гидрометиздат, 1980. 288с.

12. Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Звягинцев А.М., Лапченко В.А. Приземный озон на побережьях балканского полуострова и Крыма // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30, № 6. С. 515-523.

13. Эмануэль Н.М., Кнорре Д.Г. Курс химической кинетики: Учебник для хим. фак. ун-тов. М.: Высш. школа, 1984. 463 с.

14. Air Quality Guidelines Global Update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. WHO publications, 2005. 484 p.

15. Crutzen P.J. A discussion of the chemistry of some minor constituents in the stratosphere and troposphere // Pure and Applied Geophysics. 1973. Vol. 106. P. 1385-1399.

16. Eirini Boleti, Christoph Hueglin, Satoshi Takahama. Trends of surface maximum ozone concentrations in Switzerland based on meteorological adjustment for the period 1990–2014 // Atmospheric Environment. 2019. Vol. 213. P. 326-336.

17. Main ozone episodes. European Environment Agency publications. 2008. [Электронный ресурс]. – <https://www.eea.europa.eu/publications/C2I92-9167-076-6/page004.html>

18. Otero N., Sillmann J., Schnell J.L., Rust H.W., Butler T. Synoptic and meteorological drivers of extreme ozone concentrations over Europe // Env. Res. Let. 2016. Vol. 11. 024005.

19. Solberg S., Coddeville P., Forster C., Hov Ø., Orsolini Y., Uhse K. European surface ozone in the extreme summer 2003 // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2005. Vol. 5. P. 9003-9038.

References

1. Belan B.D. Troposfernyj ozon. 2012, 560 p. [in Russ.].
2. Grushko Ya.M. Vrednye neorganicheskie soedineniya v promyshlennykh vybrosakh v atmosferu Spravochnik. Leningrad, Khimiya publ., 1987, 190 p. [in Russ.].
3. Zvyagintsev A.M., Kuznecova I.N., Shalygina I.Yu., Nahaev M.I., Lezina E.A., Lapchenko V.A., Nikiforova M.P., Demin V.I. Actuality of observations and forecasting of surface in Russia. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem* [Problems of ecological monitoring and ecosystem modelling], 2018, vol 29, no. 1, pp. 89-106. DOI: 10.21513/0207-2564-2018-1-89-106. [in Russ.].
4. Zvyagintsev A.M. Basic Characteristics of Tropospheric Ozone Variations over Europe. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2004, vol. 29, no. 10, pp. 46-55.
5. Zvyagintsev A.M., Kakadzhanova G., Kruchenitskii G.M., Tarasova O.A. Periodic variability of surface ozone concentration over western and central Europe from observational data. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2008, vol. 33, pp. 159-166. DOI: 10.3103/S1068373908030047.
6. Zvyagintsev A.M., Kuznetsova I.N., Tarasova O.A., Shalygina I.Yu.. Variations in the concentrations of main air pollutants in London. *Atmos Ocean Opt.*, 2014, vol. 27, pp. 417-427. DOI: 10.1134/S1024856014050170.
7. Zvyagintsev, A.M., Belikov, I.B., Elanskii, N.F., Kuznetsova I.N., Romanyuk Ya.O., Sosonkin M.G., Tarasova O.A. Surface ozone concentration variability in Moscow and Kiev. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2010, vol. 35, no. 12, pp. 806-812. DOI: 10.3103/S1068373910120034.
8. Zvyagintsev A.M., Kakajanova G., Tarasova O.A. Cycles of surface ozone and other trace gases in urban and rural regions. *Optika Atmosfery i Okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics], 2010, vol. 23, no. 1, pp. 32-37 [in Russ.].
9. Zvyagintsev A.M. Surface ozone anomalies over Europe. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.*, 2004, vol. 40, no. 3, pp. 342-350.
10. Zvyagintsev A.M. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' ozona v troposfere: avtoref. avtoreferat dissertacii doktora fiz.-mat. nauk. Moscow, 2013, 48 p. [in Russ.].
11. Khragian A.Kh., Perov S.P. Sovremennye problemy atmosfernogo ozona. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1980, 288 p. [in Russ.].
12. Shalygina I.Yu., Kuznetsova I.N., Zvyagintsev A.M., Lapchenko V.A. Surface ozone at coasts of the Balkans and the Crimea. *Optika Atmosfery i Okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics], 2017, vol. 30, no. 6, pp. 515-523. [in Russ.].
13. Emanuel' N.M., Knorre D.G. Kurs khimicheskoy kinetiki: Uchebnik dlya khim. fak. un-tov. Moscow, Vysshaya shkola, 1984, 463 p. [in Russ.].
14. Air Quality Guidelines Global Update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. WHO publications, 2005, 484 p.
15. Crutzen P.J. A discussion of the chemistry of some minor constituents in the stratosphere and troposphere. *Pure and Applied Geophysics*, 1973, vol. 106, pp. 1385-1399.
16. Eirini Boleti, Christoph Hueglin, Satoshi Takahama. Trends of surface maximum ozone concentrations in Switzerland based on meteorological adjustment for the period 1990–2014. *Atmospheric Environment*, 2019, vol. 213, pp. 326-336.

17. Main ozone episodes. European Environment Agency publications. 2008. Available at: www.eea.europa.eu/publications/C2I92-9167-076-6/page004.html.

18. Otero N., Sillmann J., Schnell J.L., Rust H.W. and Butler T. Synoptic and meteorological drivers of extreme ozone concentrations over Europe. *Environmental Research Letters*, 2016, vol. 11, 024005.

19. Solberg S., Coddeville P., Forster C., Hov Ø., Orsolini Y., Uhse K.. European surface ozone in the extreme summer 2003. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 2005, vol. 5, pp. 9003-9038.

*Поступила 18.05.2020 г., одобрена после рецензирования 17.09.2020,
принята в печать 09.10.2020.
Submitted 18.05.2020; approved after reviewing 17.09.2020;
accepted for publication 09.10.2020.*