УДК [551.510.522:546.214](470.23-25)

doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-407-420

Пространственно-временное распределение концентрации приземного озона в Санкт-Петербурге

Т.Е. Симакина, С.В. Крюкова

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,
tatiana.simakina@gmail.com

По данным 12 станций экологического мониторинга в Санкт-Петербурге построены ежемесячные поля изолиний концентрации тропосферного озона. Показано увеличение концентрации приземного озона от центра города к его периферии. Выражен годовой ход пространственного распределения концентрации озона на территории Санкт-Петербурга: площадь зоны с пониженным уровнем загрязнения наиболее велика в конце осени — начале весны и уменьшается к концу весны — началу лета. Установлено наличие областей с превышением существующего на сегодняшний день норматива предельно допустимой среднесуточной концентрации в течение всего года, причем в периоды традиционного повышения приземной концентрации озона весной и летом она превышает предельно допустимую на всей территории города.

Ключевые слова: мониторинг загрязнения атмосферы, тропосферный озон, пространственно-временная изменчивость озона, сезонные вариации, предельно допустимая концентрация, интерполяция.

Spatio-temporal distribution of surface ozone in Saint Petersburg

T.E. Simakina, S.V. Kryukova

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

The paper is devoted to the research of the surface ozone distribution annual dynamics in St. Petersburg. Based on data from 12 stations of the environmental monitoring network, the analysis of distributions and time course of surface ozone concentrations has been carried out. Almost all stations have two maximum ozone concentrations — spring and summer, a minimum being in December. Using the inverse distance method the interpolation fields of surface ozone concentrations have been plotted for each month of the year. The ozone content has been shown to decrease in the troposphere from the suburbs of St. Petersburg to the city center. The diameter of the area of ozone concentrations low values has a pronounced annual course: the largest being in late autumn-early spring, decreasing by the late spring — early summer.

The presence of areas, exceeding the Russian current standard for the maximum allowable daily average concentration of $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ throughout the year, has been established, the surface ozone concentration exceeding the maximum allowable one throughout the city during the periods of spring-summer rise. The population living in the ozone-contaminated area amounts to 190 thousand inhabitants in December and increases 26 times by April—June. This fact proves the need to take urgent measures to protect the population or to review the Russian Federation current standards.

The connection has been found between duration of the surface ozone level rise and its average concentration at stations of St. Petersburg approximated by a logarithmic dependence.

It has been shown that throughout the year in St. Petersburg there is a statistically significant negative relationship between concentrations of the secondary pollutant (tropospheric ozone) and the primary pollutant (nitrogen dioxide).

Keywords: monitoring of air pollution, tropospheric ozone, spatial-temporal ozone variability, seasonal variations, maximum permissible concentration, interpolation.

For citation: T.E. Simakina, S.V. Kryukova. Spatio-temporal distribution of surface ozone in Saint Petersburg. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020. 61: 407—420. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-407-420

Введение

Известно, что газ озон в зависимости от того, на какой высоте в атмосфере он находится, играет две прямо противоположные роли. Стратосферный озон защищает человека и биосферу от опасных уровней УФ-радиации. В то же время озон в тропосфере входит в пятерку основных загрязнителей атмосферы, ему присвоен первый класс опасности. В этой связи необходим тщательный инструментальный контроль содержания тропосферного, и особенно приземного, озона. Режим регулярного мониторинга концентрации озона предполагает регистрацию эпизодов превышения предельно допустимой концентрации (ПДК) с локализацией мест превышения в пределах городской территории, оценку вероятности преодоления ПДК, выработку краткосрочных и долгосрочных планов по улучшению качества воздуха. Эти проблемы носят во многом локальный характер, поскольку протекание природных и антропогенных процессов, влияющих на приземную концентрацию озона (ПКО), зависит от местных условий.

Повышение концентрации тропосферного озона наблюдается во всех странах мира. Большинство случаев, когда в США отмечалось неудовлетворительное качество воздуха, связано с повышенным уровнем содержания озона [1]. Западная Европа помещает приземный озон на второе место в ряду наиболее опасных загрязнителей воздуха после мелких взвешенных веществ ($PM_{2.5}$). В России эпизоды, когда содержание озона превышало ПДК, впервые были зарегистрированы в Москве в конце 1990 г. [2]. Наиболее опасные случаи наблюдались в Москве и ее окрестностях в период жаркой погоды в 2002 и 2010 гг.: концентрация озона превышала все значения, когда-либо зарегистрированные в подавляющем большинстве стран Европы [3].

Во всех странах имеются государственные стандарты, регламентирующие предельно допустимые концентрации основных загрязнителей атмосферы. В России этот уровень для озона составляет: среднее за 20 мин $ПДК_{\text{мр}} = 0,16 \text{ мг/м}^3$; среднее за сутки $ПДК_{\text{сс}} = 30 \text{ мкг/м}^3$ [4].

Увеличивается объем статистически достоверных данных о корреляции повышения содержания озона в тропосфере с ростом числа определенного вида заболеваний и смертности населения [2, 3, 5]. Установлено, что воздействие озона приводит к повреждению коронарных сосудов, атеросклерозу и инфаркту, увеличению размера атеросклеротических бляшек, а также усиливает

проявления ишемических заболеваний [2]. Снижение работоспособности при высокой нагрузке на открытом воздухе в течение восьми часов наблюдается при концентрации 120 мкг/м^3 , при 200 мкг/м^3 появляются кашель, хрипота, першение в горле.

В работе [3] упоминаются следующие данные. Увеличение концентрации озона на $\sim 20 \text{ мкг/м}^3$ приводит к увеличению смертности на $\sim 0,64 \%$ от сердечно-сосудистых заболеваний и заболеваний органов дыхания. Увеличение часовой концентрации озона на $\sim 10 \text{ мкг/м}^3$ приводит к увеличению смертности на $\sim 0,45 \%$. При средней дневной (среднее значение за восемь часов светлого времени) концентрации приземного озона, равной 70 мкг/м^3 , он уже оказывает негативное влияние на здоровье человека и приводит к увеличению смертности на $\sim 0,6 \%$. В работе [5] отмечается синергизм воздействия таких факторов, как высокая температура воздуха и повышенная концентрация озона, на здоровье населения.

В сложившейся ситуации важно иметь как можно более полную и достоверную информацию о содержании озона в атмосфере, что возможно за счет организации плотной сети мониторинга качества атмосферного воздуха.

В Санкт-Петербурге развивается и функционирует сеть станций экологического мониторинга, организованная Комитетом по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности. На станциях ведутся непрерывные (с шагом 20 мин) измерения концентрации загрязняющих веществ (ЗВ), входящих в пятерку основных соединений, содержание которых в приземном слое атмосферы по требованию Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) необходимо определять для оценки качества воздуха: кроме озона, это взвешенные вещества, монооксид углерода, диоксид азота и диоксид серы. Концентрация тропосферного озона (O_3) измеряется на двенадцати из 25 станций, составляющих сеть на сегодняшний день. В сводках, печатаемых Комитетом в сети Интернет (Экологический портал Санкт-Петербурга: <http://www.infoeco.ru>), ПКО указывается в долях среднесуточной предельно допустимой концентрации.

Настоящая работа посвящена исследованию годовой динамики распределения содержания приземного озона в воздухе Санкт-Петербурга на основе интерполяционных полей, построенных методом обратных расстояний [6]. Данные о концентрации O_3 за период 2018—2019 гг. получены в результате измерений на двенадцати станциях сети мониторинга (рис. 1).

Приземный озон в Санкт-Петербурге

Основным источником озона в приземном слое атмосферного воздуха является сложный цикл фотохимических реакций [3, 5, 7] с участием ультрафиолетового солнечного излучения и первичных загрязнителей. Последние в атмосферу города поставляют в основном автотранспорт. В двигателях внутреннего сгорания при высокой температуре в результате взаимодействия атомов азота и кислорода формируются оксиды азота. При сгорании топлива в атмосферу также попадают летучие органические компоненты, включающие углеводороды. Взаимодействуя

Рис. 1. Схема размещения станций измерения ПКО в Санкт-Петербурге.

Fig. 1. The layout of the stations measuring the SOC in St. Petersburg.

в атмосфере, оксиды азота и летучие органические компоненты формируют вторичный загрязнитель — озон.

Связь с диоксидом азота можно проследить по коэффициенту корреляции. Временной ход коэффициента корреляции между ПКО и концентрацией NO_2 в Санкт-Петербурге представлен на рис. 2. Расчет выполнен по выборке объемом 144 значения, коэффициенты корреляции значимы. В течение года наблюдается отрицательная связь между первичным и вторичным ЗВ, значения коэффициента колеблются от $-0,3$ до $-0,7$. Усиления связи происходят в начале весны и начале осени, минимумы наблюдаются в мае и декабре.

В работе выполнен анализ случаев превышения ПКО национальных стандартов $\text{ПДК}_{\text{сс}}$. Продолжительность периодов превышения ПКО предельных значений изменяется от станции к станции. Обнаружена зависимость таких периодов от средней ПКО на станции: чем больше средняя концентрация, тем более длительный период превышения τ . Пример распределения числа дней за месяц, когда концентрация O_3 превышала $1 \text{ ПДК}_{\text{сс}}$, и средней концентрации озона в долях среднесуточной предельно допустимой концентрации представлен на рис. 3. Погрешность вычисления τ составила 1,8 дня, средней ПКО — $0,09 \text{ ПДК}_{\text{сс}}$.

Для зимнего периода получена эмпирическая зависимость продолжительности периода τ от среднемесячного значения ПКО:

$$\tau = 21,8 \ln(\text{ПКО}) + 15,3,$$

где ПКО — концентрация O_3 в диапазоне превышения $\text{ПДК}_{\text{сс}}$ в $0,5$ — 2 раза.

Наблюдается значительная изменчивость ПКО по территории города. Существенные различия наблюдаются даже в зимний период, когда поле ПКО по городу довольно однородно. В качестве примера на рис. 4 представлена

Рис. 2. Годовой ход коэффициента корреляции (k) между ПКО и NO_2 в Санкт-Петербурге.

Fig. 2. The annual course of the correlation coefficient between SOC and NO_2 in St. Petersburg.

Рис. 3. Продолжительность периодов (число дней) повышенного уровня ПКО (больше $30 \text{ мкг/м}^3 = 1 \text{ ПДК}_{\text{сс}}$) в зависимости от среднего значения ПКО (в долях $\text{ПДК}_{\text{сс}}$) по данным 12 станций Санкт-Петербурга в зимний период.

Fig. 3. Duration of elevated SOC levels (more than $30 \text{ }\mu\text{g/m}^3 = 1 \text{ MAC}$) depending on the average SOC values according to data from 12 stations of St. Petersburg in the winter.

Рис. 4. Распределение ПКО в зимний период в центре (станция № 7) и на периферии (станция № 11) Санкт-Петербурга.

Fig. 4. Distribution of SOC in the winter in the center and on the periphery of St. Petersburg.

гистограмма распределений ПКО за зиму на станции № 7 в центре города и на станции № 11 на периферии (Сестрорецк). Заметны различия в распределениях ПКО: близкое к экспоненциальному на центральной станции с выраженной модой около 6 мкг/м³ (0,2 ПДК_{сс}) и левосторонняя асимметрия с дисперсией в два раза большей в пригороде.

Годовая динамика ПКО на всех станциях Санкт-Петербурга представлена на рис. 5. Наиболее высокие уровни ПКО фиксируются на расстоянии 27 км к северо-западу от центра города (станция № 11 в Сестрорецке), на расстоянии 25 км к юго-востоку от центра (станция № 17 в Пушкине) и на расстоянии 20 км (станция № 25 в Металлострое). Эти станции расположены в пригородах на территории распространения шлейфов загрязненного воздуха.

На большинстве станций наблюдаются два сезонных максимума — весенний (март—апрель) и летний (июнь). Считается [8, 9], что максимумы ПКО имеют разную природу: первый связан с усилением стратосферно-тропосферного обмена и вертикального перемешивания между приземным слоем и свободной тропосферой; второй обусловлен в большей мере фотохимическим образованием озона. Поскольку вблизи максимумов временной ход приземного озона имеет сложную форму, можно говорить лишь о преобладании того или иного механизма генерации озона в зависимости от местных условий, в которых находится станция.

По соотношению амплитуды весеннего и летнему максимумов станции Санкт-Петербурга можно разделить на три группы. Отношение, близкое

Рис. 5. Сезонная динамика ПКО на 12 станциях Санкт-Петербурга.

Fig. 5. Seasonal dynamics of SOC at 12 stations in St. Petersburg.

к единице (амплитуды весеннего и летнего максимумов равны), наблюдается на семи станциях из двенадцати. На трех станциях (№ 2, 8 и 17), две из которых находятся в пригороде, амплитуда весеннего максимума превышает амплитуду летнего максимума более чем в 1,2 раза, причем на станции № 2 (станция на юго-востоке, самая дальняя от центра города) летнее повышение вовсе отсутствовало. Отсутствие ярко выраженного летнего повышения ПКО связано, по-видимому, с местоположением станций — вдали от дорог и промышленных предприятий. На двух станциях (№ 9 и 19), находящихся в непосредственной близости от кольцевой автодороги Санкт-Петербурга, картина обратная: либо существует только летний максимум (как на станции № 19), либо амплитуда летнего максимума превышает амплитуду весеннего более чем в 1,2 раза (как на станции № 9). Это подтверждает преобладающую роль антропогенного загрязнения атмосферы, связанного с выбросами автотранспорта, в механизме фотохимической генерации озона.

Сезонный минимум проявляется более четко: на всех станциях Санкт-Петербурга он начинается в июле и продолжается до декабря, т. е. с понижением температуры уменьшается интенсивность образования озона из загрязненного воздуха.

В целом по городу годовой ход средней ПКО хорошо согласуется с динамикой числа солнечных дней (рис. 6). Так, максимальное покрытие небосвода облаками в Санкт-Петербурге (более 80 %) наблюдалось в декабре, что соответствует минимуму ПКО в этом месяце.

Два пика ПКО — в апреле и июне — приходятся на периоды минимального покрытия небосвода облаками (30 и 40 % соответственно).

Рис. 6. Годовой ход средней концентрации озона (1) и количество облачности (2) в Санкт-Петербурге по данным Архива погоды в Санкт-Петербурге (<http://www.rp5.ru>) в период сентябрь 2018 г. — август 2019 г.

Fig. 6. The annual course of the average ozone concentration (1) and cloud amount (2) in St. Petersburg during September 2018 — August 2019.

Анализ пространственных максимумов O_3

Для анализа пространственного распределения тропосферного озона в воздухе Санкт-Петербурга была выполнена интерполяция среднемесячных значений ПКО методом обратных расстояний [6, 10] и построены изолинии за каждый месяц. На рис. 7 приведены распределения ПКО в период с сентября 2018 по август 2019 г.

Для эффективного сравнения на каждом поле проведены изолинии содержания озона 30 мкг/м^3 и далее с шагом 15 мкг/м^3 . Под полями изолиний ПКО на рис. 7 указано число жителей Санкт-Петербурга (тыс. чел.), проживающих на территории с уровнем загрязнения озонном выше предельно допустимого значения.

Наиболее «чистой» территория Санкт-Петербурга является в конце осени — начале зимы: на большей части города ПКО не превышает $1 \text{ ПДК}_{\text{сс}}$. Отдельные области повышенных значений располагаются на северном берегу Финского залива. Низкие значения ПКО в этот период года обусловлены коротким световым днем и, соответственно, минимумом ультрафиолета, что препятствует фотохимическим реакциям образования озона. Уменьшению ПКО способствуют большая повторяемость высоких скоростей ветра и повышенная влажность. Высокая влажность приводит к увеличению содержания влажных аэрозолей, на которых озон разрушается особенно быстро.

В январе увеличиваются размеры юго-восточной и северо-западной зон повышенного загрязнения приземным озоном, которые в декабре лишь обозначены.

Рис. 7. Поля изолиний содержания приземного озона в Санкт-Петербурге и число жителей города (тыс. чел.), проживающих на территории с ПКО выше ПДК_{сс}.

Fig. 7. Isolines fields of the surface ozone content in St. Petersburg and the population living in the territory with SOC above MAC thousands of people.

В феврале эти зоны смыкаются, образуя в центре города овальную «чистую» область. Стагнация воздуха и накоплению загрязняющих веществ способствует большая повторяемость зимних инверсий.

Далее всю весну и начало лета на всей территории города ПКО превышает ПДК_{сс}, чему способствует высокая температура [4], влияющая на интенсивность вертикального перемешивания, эмиссию предшественников озона, скорость химических реакций. Особенно существенное загрязнение по-прежнему наблюдается на северо-западе и юго-востоке города. Это, по-видимому, связано с тем, что при удалении от города в более чистые районы происходит увеличение эмиссии летучих углеводородов, дающих пероксильные радикалы [11], которые способствуют уменьшению скорости разрушения озона.

В июле и августе наблюдается квазиовальная «чистая» область, вытянутая с северо-востока на юго-запад. Летом скорость ветра меньше, и это способствует ослаблению горизонтального переноса и накоплению загрязнителей в местах

выбросов. Наличие водоемов (Финский залив, Нева) приводит к возникновению циркуляции бризового типа, которая также может формировать температурные инверсии, запирающие загрязнители вблизи поверхности.

Число жителей, подвергающихся воздействию ЗВ, изменяется от 4,6 тыс. в октябре до почти 5 млн в апреле и июне.

Соответствие ПКО в Санкт-Петербурге национальным стандартам качества воздуха

В Нормативах для РФ установлены два равноправных значения ПДК для озона. Проведенное исследование показало, что в течение всего рассматриваемого периода (2018—2019 гг.) на территории Санкт-Петербурга существуют области, где показатель $\text{ПДК}_{\text{ср}}$ превышен, и, таким образом, атмосферный воздух города следует считать опасным для здоровья жителей в течение практически всего года. Сделанный вывод требует принятия каких-либо решений — либо защиты населения от токсичного воздействия ПКО, либо пересмотра нормативов качества воздуха.

Аналогичная ситуация наблюдается в Московском регионе и Мурманской области, где среднесуточные значения ПКО превышают предельно допустимую среднесуточную концентрацию 95 % дней в году [12]. Среднегодовая концентрация озона превышает 30 мкг/м^3 практически на всей территории Западной Европы [1].

Отметим, что уровень остальных четырех ЗВ, отнесенных ВОЗ к наиболее опасным, редко превышает установленные для них $\text{ПДК}_{\text{ср}}$. На рис. 8 представлены среднегодовые значения концентрации всех пяти основных ЗВ в долях $\text{ПДК}_{\text{ср}}$. Из рисунка видно, насколько озон выбивается из общей картины.

Нормирование концентрации озона по его среднесуточному значению принято только в РФ и некоторых странах СНГ. Если придерживаться норм Беларуси, то случаев превышения ПКО в Санкт-Петербурге за рассматриваемый период не отмечалось, поскольку там норма в три раза выше и составляет 90 мкг/м^3 [1]. За рубежом в качестве оценки загрязнения воздуха озоном используется скользящее среднее за восемь часов значение концентрации (рассчитываемое по среднечасовым значениям) [13]. Выбор восьмичасового интервала обусловлен средним временем пребывания человека на открытом воздухе.

Другой нормирующий показатель качества воздуха в РФ — предельно допустимая максимальная разовая концентрация озона ($\text{МДК}_{\text{мр}}$) — в Санкт-Петербурге за рассматриваемый период времени не был превышен ни разу. В работах [14, 15] отмечается, что в России случаи превышения $\text{ПДК}_{\text{мр}}$ отмечаются нечасто.

Поскольку фотохимическое образование озона происходит в дневные часы, а ночью озон разрушается за счет стока в газовых реакциях с теми же оксидами азота и углеводородами [12], среднесуточные ПКО сглаживают высокие дневные значения приземной концентрации озона и могут оказаться близкими к фоновым значениям. Авторы в работе [12] также указывают на недостаточную физическую обоснованность норматива $\text{ПДК}_{\text{ср}}$, что требует его отмены или,

Рис. 8. Пять основных ЗВ в долях ПДК_{сс} за период 2018—2019 гг. в Санкт-Петербурге по данным www.infoeco.ru.

Fig. 8. Five main pollutants in the shares of MAC in St. Petersburg, www.infoeco.ru.

по крайней мере, пересмотра его численного значения с учетом результатов современных исследований влияния озона на здоровье населения и международного опыта.

Заклучение

В результате мезомасштабного пространственно-временного исследования приземного озона в воздухе Санкт-Петербурга в 2018—2019 гг. сделаны следующие выводы.

Содержание озона в тропосфере пригородов Санкт-Петербурга, как и других мегаполисов, выше, чем в самом городе, практически в течение всего года. Область пониженных значений ПКО представляет собой квазиокружность, диаметр которой уменьшается к весеннему (апрель) и летнему (июнь) повышению ПКО. Рост концентрации O_3 отмечен в направлениях на северо-запад и юго-восток от центра. Это обусловлено высоким уровнем загрязненности воздуха предшественниками озона, присутствующими в городских условиях вблизи автомагистралей и на перекрестках, что приводит к сдвигу равновесия комплекса фотохимических реакций, обуславливающих образование и связывание озона, в сторону уменьшения его содержания в атмосфере. На периферии города возрастает роль других факторов — солнечного излучения, температуры и влажности воздуха, процессов перемешивания воздуха. Сочетание этих факторов при невысоком уровне

загрязнения атмосферы приводит к повышению содержания озона. В более чистых районах скорость разрушения озона уменьшается также за счет увеличения эмиссии летучих углеводородов.

Показано, что при существующих значениях ПДК_{сс}, равных 30 мкг/м³, в ряде районов на территории Санкт-Петербурга ПКО превышает 1 ПДК_{сс} в течение практически всего года, а в апреле и июне это отмечается на всей территории города. Численность населения, проживающего на загрязненной озоном территории, составляет 190 тыс. жителей в декабре и возрастает в 26 раз к апрелю—июню. Этот факт доказывает необходимость принятия экстренных мер по защите населения либо пересмотра действующих в РФ нормативов.

Обнаружена взаимосвязь длительности периода повышения уровня ПКО и среднего значения ПКО, которую удалось аппроксимировать логарифмической функцией.

Показано, что в течение всего года в Санкт-Петербурге наблюдается статистически значимая отрицательная связь концентрации тропосферного озона с концентрацией диоксида азота.

Список литературы

1. Звягинцев А.М., Варгин П.Н., Пешин С. Изменчивость и тренды общего содержания озона в период 1979—2014 гг. // *Оптика атмосферы и океана*. 2015. Т. 28, № 9. С. 800—809.
2. Котельников С.Н., Степанов Е.В. Мониторинг тропосферного озона в атмосфере мегаполисов и малоурбанизированных районов // *Труды института общей физики им. А.М. Прохорова РАН*. 2015. Т. 71. С. 43—71.
3. Котельников С.Н., Степанов Е.В., Ивашкин В.Т. Приземные концентрации озона и здоровье различных возрастных групп населения в г. Москве летом 2010 г. // *Геофизические процессы и биосфера*. 2019. Т. 18, № 4. С. 26—38.
4. Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю. и др. Актуальность наблюдений и прогноза приземного озона в России // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. 2018. Т. 29, № 1. С. 89—106.
5. Monks P.S., et al. Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. P. 8889—8973.
6. Крюкова С.В., Симакина Т.Е. Оценка методов пространственной интерполяции метеорологических данных // *Общество. Среда. Развитие*. 2018. № 1. С. 144—151.
7. Лапченко В.А., Звягинцев А.М. Приземный озон в Крыму // *Пространство и Время*. 2014. № 2(16). С. 254—257.
8. Латышева И.В., Лощенко К.А., Миллер Е.В. Современные особенности распределения озона в Иркутске // *Известия ИГУ. Сер.: Науки о Земле*. 2011. Т. 4, № 1. С. 146—163.
9. Котельников С.Н., Степанов Е.В., Челибанов В.П. Пространственно-временная изменчивость приземного озона в Санкт-Петербурге, Кировской области и Крыму в 2011—2012 гг. // *Оптика атмосферы и океана*. 2016. Т. 29, № 12. С. 1086—1089.
10. Симакина Т.Е., Крюкова С.В. Районирование территории Санкт-Петербурга по приземному озону в зимний период // *Общество. Среда. Развитие*. 2019. № 4. С. 97—103.
11. Котельников С.Н. Основные механизмы взаимодействия озона с живыми системами и особенности проблемы приземного озона для России // *Труды института общей физики им. А.М. Прохорова РАН*. 2015. Т. 71. С. 10—41.
12. Демин В.И., Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н. О действующих в Российской Федерации нормативах по содержанию озона в атмосферном воздухе // *Экология человека*. 2009. № 1. С. 4—8.
13. Bloomer B.J., et al. Observed relationships of ozone air pollution with temperature and emissions // *Geophysical research letters*. 2009. V. 36. L09803.

14. Звягинцев А.М., Иванова Н.С., Крученицкий Г.М. и др. Содержание озона над территорией Российской Федерации в 2005 г. // Метеорология и гидрология. 2006. № 2. С. 119—124.
15. Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю. и др. Причины и факторы положительных аномалий приземной концентрации озона в Московском регионе и на Юго-Восточном побережье Крыма // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 6. С. 493—502.

References

1. Zvyagintsev A.M., Vargin P.N., Peshin S. Total ozone content variability and trends during 1979—2014. *Optika atmosfery i okeana*. Optics of the atmosphere and ocean. 2015, 28(9): 800—809. [In Russian]. doi: 10.15372/AOO20150905
2. Kotelnikov S.N., Stepanov E.V. Monitoring of tropospheric ozone in the atmosphere of megalopolises and low-urban areas. *Trudy instituta obshchey fiziki im. A.M. Prokhorova RAN*. Proceedings of the Institute of General Physics. A.M. Prokhorov RAS. 2015, 71: 43—71. [In Russian]. doi: 10.21455/GPB2019.4-3
3. Kotelnikov S.N., Stepanov E.V., Ivashkin V.T. Surface concentrations of ozone and health of various age groups in Moscow in the summer 2010. *Geofizicheskiye protsessy i biosfera*. Geophysical Processes and the Biosphere. 2019, 18 (4): 26—38. [In Russian]. <https://doi.org/10.21455/GPB2019.4-3>
4. Zvyagintsev A.M., Kuznetsova I.N., Shalygina I.Yu. et al. Relevance of observations and prediction of surface ozone in Russia. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*. Environmental monitoring and ecosystem modeling problems. 2018, 29(1): 89—106. [In Russian]. doi: 10.21513/0207-2564-2018-1-89-106.
5. Monks P.S. et al. Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer. *Atmos. Chem. Phys.* 2015, 15: 8889—8973. doi:10.5194/acp-15-8889-2015.
6. Kryukova S.V., Simakina T.E. Assessment of meteorological data spatial interpolation methods. *Obshchestvo. Sreda. Razvitiye*. Society. Environment. Development. 2018, 1: 144—151. [In Russian].
7. Lapchenko V.A., Zvyagintsev A.M. Ground-level ozone in Crimea. *Prostranstvo i Vremya*. Space and time. 2014, 2 (16): 254—257. [In Russian].
8. Latysheva I.V., Loshchenko K.A., Miller E.V. Modern features of the ozone distribution in Irkutsk. *Izvestiya IGU. Ser. Nauki o Zemle*. Izvestia ISU. Ser. “Earth Sciences”. 2011, 4(1): 146—163. [In Russian].
9. Kotelnikov S.N., Stepanov E.V., Chelibanov V.P. Spatial and temporal variability of ground-level ozone in St. Petersburg, the Kirov region, and Crimea in 2011—2012. *Optika atmosfery i okeana*. Optics of the atmosphere and ocean. 2016, 29 (12): 1086—1089. [In Russian]. doi: 10.15372/AOO20161213
10. Simakina T.E., Kryukova S.V. Zoning of the St. Petersburg territory on surface ozone in the winter. *Obshchestvo. Sreda. Razvitiye*. Society. Environment. Development. 2019, 4: 97—103. [In Russian].
11. Kotelnikov S.N. The main mechanisms of interaction of ozone with living systems and features of the problem of surface ozone for Russia. *Trudy instituta obshchey fiziki im. A.M. Prokhorova RAN*. Proceedings of the Institute of General Physics. A.M. Prokhorov RAS. 2015, 71: 10—41. [In Russian].
12. Demin V.I., Zvyagintsev A.M., Kuznetsova I.N. About the standards in the Russian Federation on the ozone content in atmospheric air. *Ekologiya cheloveka*. Human ecology. 2009, 1: 4—8. [In Russian].
13. Bloomer B.J., et al. Observed relationships of ozone air pollution with temperature and emissions. *Geophysical research letters*. 2009, 36: L09803. doi:10.1029/2009GL037308.
14. Zvyagintsev A.M., Ivanova N.S., Kruchenitsky G.M. et al. Ozone content over the territory of the Russian Federation in 2005. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2006, 2: 119—124. [In Russian].
15. Zvyagintsev A.M., Kuznetsova I.N., Shalygina I.Yu. et al. Causes and factors of positive anomalies of surface ozone concentration in the Moscow region and on the South-East coast of Crimea. *Optika atmosfery i okeana*. Optics of the atmosphere and ocean. 2016. 29(6): 493—502. [In Russian]. doi: 10.15372/AOO20160608.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 13.07.2020
Принята к публикации 27.09.2020

Сведения об авторах

Симакина Татьяна Евгеньевна, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета, tatiana.simakina@gmail.com.

Крюкова Светлана Викторовна, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета, krukos@rambler.ru.

Information about authors

Simakina Tatyana Evgenievna, PhD (Phys. and Math. Sci.), Associate Professor, Department of Experimental Atmospheric Physics, Russian State Hydrometeorological University.

Kryukova Svetlana Victorovna, PhD (Phys. and Math. Sci.), Associate Professor, Department of Experimental Atmospheric Physics, Russian State Hydrometeorological University.