

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.510.42

## Приземный озон в атмосфере Москвы во время пандемии COVID-19

Е.В. Степанов<sup>1</sup>✉, В.В. Андреев<sup>2</sup>, Л.В. Коновальцева<sup>2</sup>,  
С.Г. Касоев<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38

<sup>2</sup>Российский университет дружбы народов

117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

Поступила в редакцию 12.05.2022 г.;

после доработки 1.06.2022 г.;

принята к печати 15.06.2022 г.

Представлены результаты мониторинга приземного озона в атмосфере Москвы в 2020 и 2021 гг. в условиях строгих ограничений, связанных с пандемией COVID-19. Эти два года существенно различались метеорологическими условиями и уровнем антропогенной нагрузки на окружающую среду. В 2020 г. в Москве наблюдался относительно низкий для мегаполиса уровень приземных концентраций  $O_3$ . Среднегодовое значение составило  $28 \text{ мкг/м}^3$ , а максимальное за год —  $185 \text{ мкг/м}^3$ . Это обусловлено сочетанием относительно прохладной летней погоды с низким содержанием загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Летом 2021 г. наблюдались волны сильной жары в условиях блокирующего антициклона, дневные температуры поднимались до  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ . В сочетании с более высокой загрязненностью атмосферного воздуха это стало причиной необычно высоких концентраций  $O_3$ . Среднегодовое значение составило  $48 \text{ мкг/м}^3$ , а максимальное годовое —  $482 \text{ мкг/м}^3$ .

*Ключевые слова:* атмосфера, воздух, приземный озон, предельно допустимая концентрация, приземный слой, тропосфера, прекурсоры озона, пандемия COVID-19, режим строгой изоляции; atmosphere, air, surface ozone, maximum permissible concentration, surface air layer, troposphere, ozone precursor, pandemic, COVID-19, lockdown.

### Введение

Приземный озон — важный химический компонент земной атмосферы, играющий заметную роль в формировании ее окислительного потенциала [1, 2]. В свою очередь, окисление веществ как органического, так и неорганического происхождения является одной из основных составляющих круговорота веществ в природе [2].

Существенное влияние приземный озон оказывает и на живые организмы. В незагрязненной атмосфере содержится незначительное, фоновое количество озона (до  $30 \text{ мкг/м}^3$ ). В таких концентрациях при воздействии на живые организмы он играет роль мягкого мутагенного и тонизирующего фактора, обеспечивающего адаптацию к изменениям окружающей среды и эволюцию [3–8]. При введении в организм человека в составе водных растворов озон может играть иммуномодулирующее, противовоспалительное, антибактериальное, противовирусное, противогрибковое действие [9].

Высокие концентрации озона, наблюдающиеся при сильном загрязнении атмосферного воздуха в больших городах и промышленных регионах и превышающие установленные санитарные нормы (предельно допустимая среднесуточная концентрация озона ( $ПДК_{cc}$ ) составляет  $30 \text{ мкг/м}^3$ , а максимальная разовая ( $ПДК_{мр}$ ) —  $160 \text{ мкг/м}^3$ ), обладают патогенными свойствами [10–14]. Озон как сильный окислитель пагубно воздействует на органы дыхания, вызывает системное воспаление в органах кровообращения. С ростом содержания озона в приземной атмосфере связывают не только повышенную заболеваемость органов дыхания, кровоснабжения и нервной системы, но и рост общей смертности [15–17]. Высокое содержание приземного озона также негативно влияет на экосистемы, леса, отдельные растения и урожайность некоторых агрокультур [18, 19].

В чистой приземной атмосфере озон образуется в цикле фотохимических реакций с участием окислов азота и солнечного УФ-излучения и исчезает, химически связываясь с монооксидом азота (NO) или подвергаясь сухому осаждению [1, 2]. В атмосфере, загрязненной продуктами неполного сгорания (окись углерода, летучие углеводороды), процесс связывания озона с NO замедляется, и скорость образования озона может существенно превышать скорость его разложения. В этом случае наблюдается накопление

\* Евгений Валерьевич Степанов (eugenestepanov@yandex.ru); Виктор Викторович Андреев (vvandreev@mail.ru); Людмила Владимировна Коновальцева (konovaltseva-lv@rudn.ru); Сергей Георгиевич Касоев (sergey-kasoev@yandex.ru).

озона и повышение его концентрации в приземном слое атмосферы. Увеличение температуры также приводит к существенному росту скорости образования озона [1, 2]. Его содержание в приземном слое зависит от влажности воздуха, интенсивности процессов перемешивания воздушных масс за счет ветра, разложения и осаждения при взаимодействии с земной поверхностью, растительностью и почвой.

Повышение приземных концентраций озона (ПКО) представляет наибольшую проблему в больших городах и индустриально развитых южных регионах, например в Северной Америке, странах Южной Европы и Китае, где велика антропогенная нагрузка на окружающую среду и жаркий климат. В России, в частности в Москве, высокие концентрации озона в приземной атмосфере начали регистрироваться последние два десятилетия [20–24]. Это обусловлено, во-первых, стремительным увеличением количества автомобилей и, как следствие, выбросов выхлопных газов в атмосферу; во-вторых, происходящими климатическими изменениями, в результате которых в средней полосе России стали регулярно наблюдаться волны тепла с дневными температурами до 35–40 °С.

В 2020 и 2021 гг. в воздушном бассейне Московского региона сложилась уникальная ситуация, позволяющая оценить влияние как высоких температур, так и загрязняющих газов на скорость образования и накопление озона в приземной атмосфере.

В 2020 г. началась пандемия COVID-19 и в марте в России были введены «меры повышенной готовности» и режим строгой изоляции (локдаун). Как и в соседних странах Европы и Китае, в России резко снизилась экономическая активность, интенсивность потоков автомобильного и авиационного транспорта. Одновременное соблюдение режима строгой изоляции во многих странах привело к заметному уменьшению выбросов загрязняющих веществ в атмосферу по всему миру, что было зафиксировано многочисленными средствами мониторинга качества атмосферного воздуха [25–27]. При этом появились сообщения и об аномальных уровнях озона в приземной атмосфере [28–32], причем как о случаях его увеличения [33, 34], так и уменьшения [35–37]. Эффект снижения ПКО при введении режима строгой изоляции был зарегистрирован и нами на станции мониторинга приземного озона, расположенной в фоновом равнинном районе средней полосы России в г. Вятские Поляны Кировской обл. [37, 38]. На этой станции в конце марта, т.е. сразу после введения в России режима повышенной готовности, наблюдалось резкое скачкообразное трехкратное снижение ПКО, как усредненных за месяц минимальных ночных, так и максимальных дневных. Традиционный весенний максимум ПКО в апреле практически не наблюдался на этой станции. Полученные результаты свидетельствуют не только о локальном, но и о глобальном снижении содержания приземного озона в атмосфере.

2021 г. оказался особенным по метеорологическим условиям. Ограничения, связанные с пандемией, в Москве были ослаблены, поэтому концентрации

загрязняющих веществ в атмосфере города вернулись к прежнему уровню. В то же время весна и лето в средней полосе России были теплее и суше, чем обычно. Это связано с особенностями крупномасштабной циркуляции воздуха, сформировавшей условия как для аномально высоких температур, так и для накопления загрязняющих веществ в приземной атмосфере [39, 40]. Таким образом, в Московском регионе 2020 и 2021 гг. существенно различались по метеорологическим условиям и уровню антропогенной нагрузки на воздушную среду.

Цель настоящей работы – сравнительный анализ долговременных ходов ПКО, зафиксированных в центре Москвы на станции мониторинга РУДН в 2020 и 2021 гг., и выяснение роли температуры и концентрации газообразных загрязнителей в образовании озона в условиях мегаполиса.

## Приборы и методы

Сбор анализируемых данных осуществлялся на станции мониторинга приземного озона, его прекурсоров и основных метеопараметров, которая начала функционировать в Российском университете дружбы народов при участии Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН в конце 2019 г. Она расположена в центре Москвы, в пределах Третьего транспортного кольца на ул. Орджоникидзе (55°42'37" с.ш., 37°36'78" в.д., высота н. у. м. 149 м). Станция находится в окружении городской жилой застройки, а также нескольких скверов и бульваров. Ближайшие транспортные автомагистрали, являющиеся основными источниками прекурсоров озона, находятся на удалении более 1 км от станции. Промышленные объекты в районе расположения станции отсутствуют.

Помимо измерений концентрации O<sub>3</sub> на станции также проводится мониторинг NO, NO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, суммы углеводородов, массовой концентрации аэрозольных частиц различного размера, а также основных метеорологических параметров. Для измерений концентрации озона используется хемилюминесцентный газоанализатор типа З-02П, разработанный и изготовленный предприятием ЗАО «ОПТЭК» (г. Санкт-Петербург) и имеющий международную сертификацию Агентства защиты окружающей среды США (U.S. Environmental Protection Agency) [41, 42]. Основные метрологические характеристики анализатора: динамический диапазон – 0–500 мкг/м<sup>3</sup>, чувствительность – 1 мкг/м<sup>3</sup>, предел погрешности – 15%, время интегрирования – 1 мин, частота регистрации – 1 раз в минуту. Для снижения погрешности измерений каждые 10 мин производится автоматическая калибровка прибора с использованием калибровочной газовой смеси и «нулевого газа». Раз в год производитель проводит поверку и калибровку прибора с использованием рабочего эталона 1-го разряда единицы молярной доли озона в озоно-воздушных смесях РЭ 154-1-33-2008, хранящегося на приборостроительном предприятии «ОПТЭК». Газоанализатор работает в составе автоматизированного измерительного комплекса, обеспечивающего

сбор, хранение, предварительную обработку и передачу данных, их визуализацию и дистанционное управление. Забор воздуха осуществляется во внутреннем дворе комплекса зданий РУДН с высоты ~ 5 м через стандартные тефлоновые пробоотборники. Измерения проводятся в режиме непрерывного долговременного мониторинга. Текущие значения измеряемых параметров регистрируются 1 раз в минуту и сохраняются в базе данных измерительного комплекса.

## Результаты мониторинга озона в приземной атмосфере

Мониторинг приземного озона проводился нами непрерывно в течение 2020 и 2021 гг.

На рис. 1 показан временной ход средних часовых ПКО, зарегистрированных за эти два года. Отчетливо видны два годовых цикла изменений концентрации озона, которые обусловлены годовой циклическостью температуры, освещенности и продолжительности светового дня. Минимальные концентрации приземного озона наблюдаются в зимнее время при низких температурах и коротком световом дне. Годовой ход ПКО очень типичен для атмосферы мегаполиса. Рост дневных температур весной сопровождается увеличением ПКО. Максимальных значений ПКО достигает летом, в июне или июле. В августе начинается постепенное снижение ПКО, обусловленное уменьшением средних дневных температур и продолжительности светового дня. Видна сильная временная вариабельность содержания озона в приземной атмосфере в течение года. Значения ПКО в течение достаточно короткого времени (нескольких часов) могут меняться от нулевых до максимальных, поэтому годовые ходы выглядят «зашумленными» случайными флуктуациями.

Если максимальные ПКО, наблюдавшиеся в атмосфере Москвы в конце июня 2020 г., составляли не более 180 мкг/м<sup>3</sup>, то 2021 г. был отмечен их аномально высокими значениями. Заметный монотонный рост ПКО начался уже в марте. В апреле среднесуточные концентрации существенно превышали уровень ПДК<sub>сс</sub> и достигали значений выше 100 мкг/м<sup>3</sup>, а максимальные за сутки часовые концентрации стали регулярно превышать значение ПДК<sub>мр</sub>. В середине мая рост интенсивности фотохимического образова-

ния озона в приземной атмосфере обусловил ежедневное превышение максимальными суточными концентрациями уровня 200 мкг/м<sup>3</sup>. Экстремально высокие ПКО в московской атмосфере наблюдались в июне и июле при прохождении трех волн тепла. В этот временной промежуток характер погоды определялся устойчивым блокирующим антициклоном, который сформировал условия, с одной стороны, для аномально высоких температур и низкой влажности, а с другой — для накопления загрязняющих веществ в приземной атмосфере [39, 40]. При этом в течение нескольких дней максимальные дневные температуры достигали 35 °С, а ночные не опускались ниже 25 °С. В дневные часы было сухо, относительная влажность опускалась ниже 35%, атмосферное давление достигало 758 мм р. ст., а скорость ветра преимущественно юго-западных направлений составляла до 2 м/с. В ночные часы направление ветра менялось на юго-восточное, а его скорость падала практически до нуля. Такие условия были идеальными для интенсивного фотохимического образования и накопления озона в дневные часы. Более 40 дней, с середины июня до середины августа, ПКО, превышавшие 160 мкг/м<sup>3</sup>, наблюдались от 6 до 10 ч в день. Волны тепла, длившиеся 10–14 дней, разделялись краткими периодами дождливой погоды, во время которых максимальные дневные ПКО снижались до уровня ~ 100 мкг/м<sup>3</sup>. Характерная особенность суточного цикла приземного озона в мегаполисах в весенне-летний период — падение ночных концентраций озона практически до нуля независимо от того, насколько высокими были дневные концентрации (рис. 2). Такая закономерность, обусловленная относительно высоким содержанием NO в атмосфере Москвы в ночное время, наблюдалась практически в течение всего лета 2021 г.

Для сравнения на рис. 2 в более крупном масштабе показаны вариации озона в те периоды 2020 и 2021 гг., когда регистрировались наиболее высокие значения ПКО.

Можно отметить несколько наиболее важных особенностей временных вариаций ПКО. Во-первых, хорошо виден упоминавшийся выше волнообразный характер дневных ПКО, когда периоды высоких концентраций сменяются периодами умеренных. На графике 2020 г. видны две волны незначительного

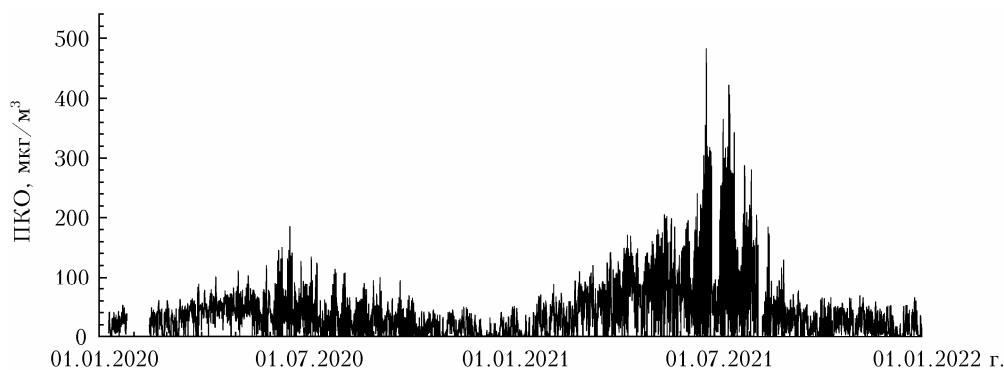


Рис. 1. Временной ход ПКО на ст. РУДН, Москва

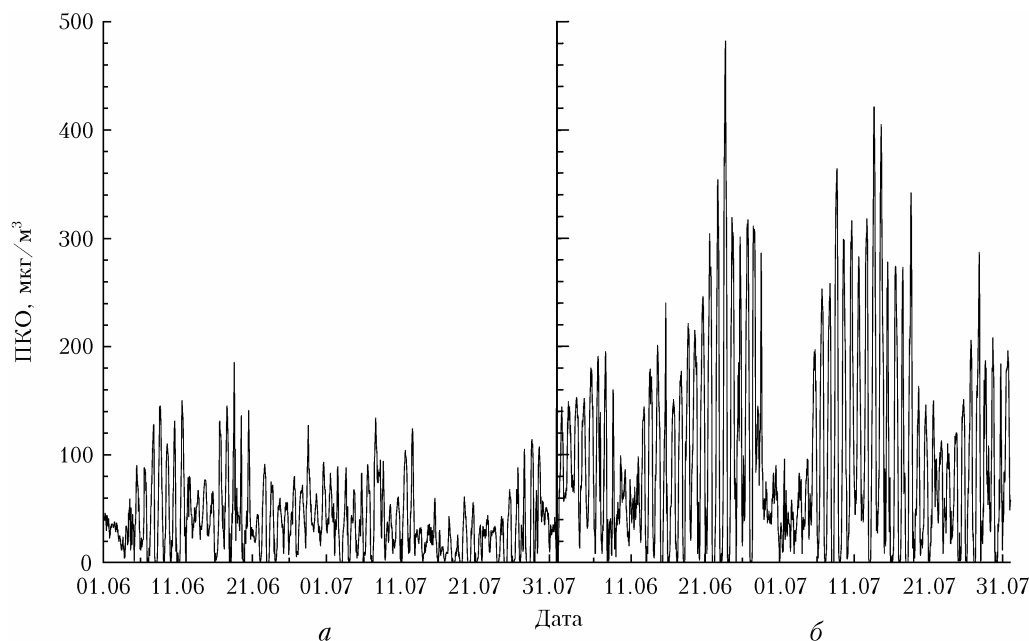


Рис. 2. Вариации значений среднечасовой ПКО в периоды достижения максимальных уровней в июне-июле 2020 (а) и 2021 гг. (б) на ст. РУДН

повышения ПКО, а на графике 2021 г. — две наиболее интенсивные в этом году волны, во время которых ПКО достигла максимального значения  $\sim 482$  мкг/м<sup>3</sup>. Во-вторых, отчетливо виден циркадный ритм временных вариаций ПКО, связанный с чередованием дня и ночи. В ночные часы наблюдаются очень низкие ПКО, а в дневные часы — наиболее высокие. Таким образом, при детальном рассмотрении «шумовой» характер вариаций приобретает закономерную периодичность. Наличие циркадного ритма ПКО позволяет проводить усреднение и накопление данных посуточно, что оказывается более информативным, чем простое последовательное сглаживание данных. Этот подход широко используется при анализе как суточной изменчивости ПКО, так и ее протяженных трендов [1, 17, 20, 22–24, 43].

На рис. 3 приведены суточные вариации ПКО и температуры при сезонном усреднении. Они получены с помощью почасового сложения и последующей нормировки суточных ходов этих параметров в каждый из сезонов. Видно, что, несмотря на то, что температура зимой 2021 г. была в среднем на  $\sim 5$  °С ниже, чем в 2020 г., зимние суточные ходы ПКО в 2020 и 2021 гг. различаются слабо. Это можно объяснить тем, что в зимой при низких температурах фотохимическое образование озона незначительно и такая разница средних температур не влияет заметным образом на дневную продукцию озона.

Весной усредненные за сезон температурные ходы 2020 и 2021 гг. совпадали. В то же время амплитуда дневного максимума ПКО весной 2021 г. оказалась почти в два раза, а дневной прирост ПКО (разница между дневным максимумом и ночным минимумом) — почти в три раза выше, чем в 2020 г.

Это различие можно связать со снижением загрязненности воздуха мегаполиса оксидами азота, монооксидом углерода и летучими органическими соединениями весной 2020 г. во время пандемии COVID-19 и, как следствие, более низкой дневной продукции озона в 2020 г. по сравнению с 2021 г. при близком температурном режиме.

Как упоминалось выше, лето 2021 г. было жарким, усредненный летний суточный ход температуры лежит на  $\sim 10$  °С выше, чем для 2020 г. Разница летних суточных ходов ПКО для 2020 и 2021 гг. становится еще контрастнее. Учитывая разницу в загрязнении атмосферы, наблюдаемую весной 2020 и 2021 гг., повышение ПКО летом 2021 г. может быть обусловлено совокупным воздействием более высоких температур и более высокой загрязненности московского воздуха прекурсорами озона.

Осенью, несмотря на небольшое различие усредненных температур, суточные ходы ПКО 2020 и 2021 гг. слабо различаются, что, как и в зимний период, может быть связано с низкой эффективностью фотохимического образования озона.

Совокупное воздействие повышения температуры и концентрации предикторов озона на уровни ПКО можно отчетливо наблюдать на диаграмме распределения средних часовых значений ПКО в зависимости от температуры атмосферного воздуха (рис. 4). Диаграмма точно характеризует различие температурных условий рассматриваемых лет. В 2020 г. температура изменялась в диапазоне от  $-10$  до  $+32$  °С, а в 2021 г. — от  $-20$  до  $+35$  °С. Видно, что при температурах до  $+10$  °С зависимость ПКО от температуры достаточно слабая. Резкая, экспоненциальная [1, 2] зависимость становится заметной после  $+20$  °С. При этом область регистрируемых значений ПКО 2020 г. лежит ниже области 2021 г.

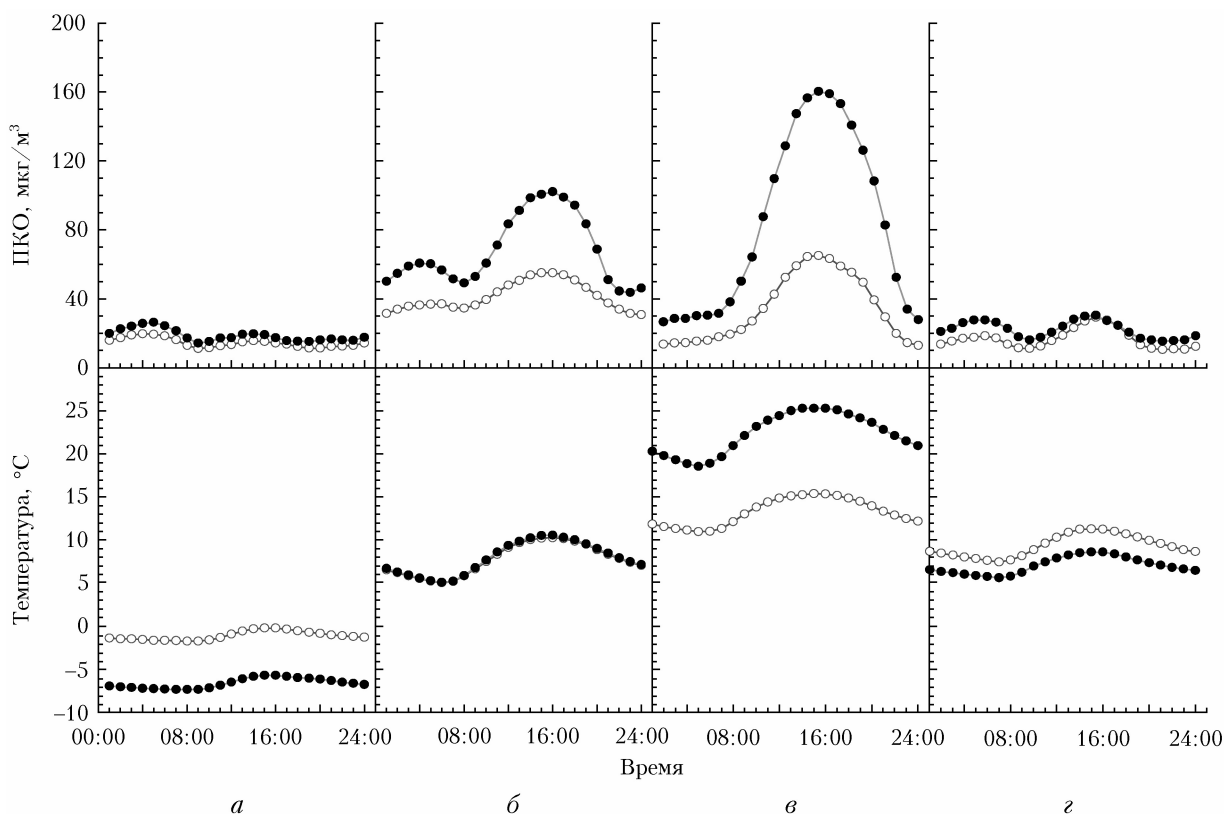


Рис. 3. Сезонные суточные вариации ПКО и температуры в 2020 (белые кружки) и 2021 гг. (черные кружки) на ст. РУДН: а – зима; б – весна; в – лето; г – осень

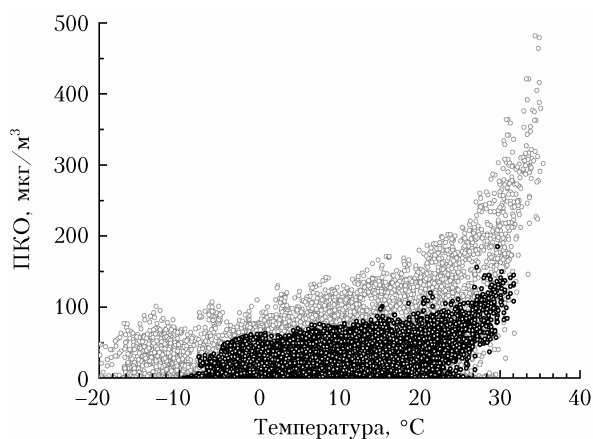


Рис. 4. Распределение среднечасовых ПКО при различных температурах атмосферного воздуха в 2020 (черные кружки) и 2021 гг. (серые кружки) на ст. РУДН

для всех температур. До температур  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  наблюдается двухкратное различие в диапазоне значений ПКО. После  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  это различие стремительно увеличивается и при температуре выше  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$  становится трехкратным.

Наблюдаемое на диаграмме различие распределений ПКО в 2020 и 2021 гг. в зависимости от температуры также может указывать на более низкую загрязненность воздуха в Москве в 2020 г. Видно,

что при температурах выше  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$  сильное загрязнение воздуха прекурсорами озона приводит к экспоненциальному увеличению концентрации озона в приземной атмосфере.

На рис. 5 показаны среднемесячные концентрации  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  в приземной атмосфере Москвы в 2020–2021 гг., рассчитанные на основе данных мониторинга. Видно, что апрель 2020 г. выделяется резким и значительным снижением содержания всех этих газов в воздухе, что обусловлено началом периода изоляции. В апреле и мае эти меры соблюдались наиболее строго. Через два месяца начинается постепенное возвращение уровня загрязняющих веществ в атмосфере к прежним и даже большим значениям, что можно объяснить адаптацией промышленности и транспорта к условиям пандемии. В начале 2021 г. зарегистрированы наиболее высокие за рассматриваемый двухлетний период концентрации как углеродсодержащих веществ ( $\text{CO}$  и  $\text{CH}_4$ ), так и  $\text{NO}_2$ . Содержание  $\text{CO}$  и  $\text{NO}_2$  в начале 2021 г. было на  $\sim 30\%$  выше среднего, а  $\text{CH}_4$  — на  $\sim 70\%$  выше среднего. Отметим отчетливо проявляющиеся на диаграммах особенности сезонных вариаций  $\text{NO}$  в городской атмосфере. Минимальные концентрации этого вещества наблюдаются в те периоды, когда содержание озона максимально.

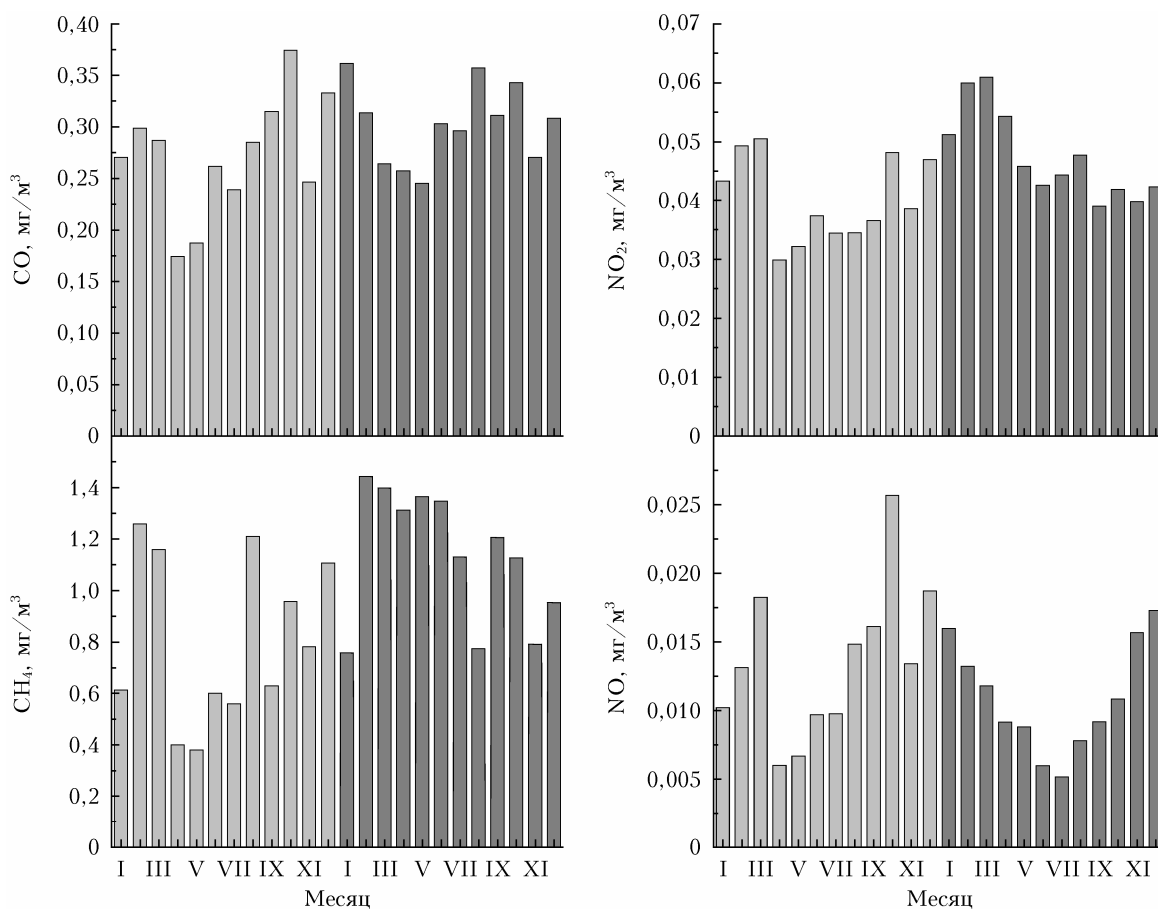


Рис. 5. Среднемесячные концентрации основных прекурсоров приземного озона CO, CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub> и NO в атмосфере в 2020 (светло-серые столбцы) и 2021 гг. (темно-серые столбцы) на ст. РУДН

## Обсуждение

Представленные выше результаты показывают, что введение в 2020 г. в Москве мер повышенной готовности, обусловленных пандемией COVID-19, привело к значительным изменениям содержания загрязняющих веществ в городской атмосфере. Это обусловлено снижением общей антропогенной нагрузки на окружающую среду, так как в городе была значительно снижена экономическая активность, интенсивность работы автомобильного и авиационного транспорта. Точная количественная оценка эффекта общего очищения воздуха в Москве в этот период затруднительна, однако данные мониторинга на станции РУДН отчетливо указывают на снижение локального содержания NO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> в полтора раза в приземной атмосфере в центре Москвы в начале пандемии (рис. 5). По метеорологическим условиям первый год пандемии не сильно отличался от среднестатистического. В результате снижения загрязнения атмосферного воздуха в течение всего 2020 г. наблюдались достаточно низкие для такого большого мегаполиса как Москва приземные концентрации озона, который в данном случае выступает как интегральный индикатор общего загрязнения атмосферного воздуха [1, 2]. В частности,

превышение ПДК<sub>мр</sub> наблюдалось всего один раз за весь год. Максимальная за год среднечасовая ПКО составила 185 мкг/м<sup>3</sup>, среднегодовая ПКО – 28 мкг/м<sup>3</sup>, усредненная за год максимальная суточная ПКО – 55 мкг/м<sup>3</sup>. Значение процентиля P80(1h) в годовом распределении максимальных суточных ПКО в 2020 г. составило 76 мкг/м<sup>3</sup>. В дальнейшем такие значения возможно использовать в качестве целевого интегрального показателя качества воздуха в Москве.

Метеоусловия в 2020 и 2021 гг. в Москве значительно различались. Летом 2021 г. наблюдалось несколько волн жары с максимальной дневной температурой +35 °С. (Сильное различие состоит не только в более высокой температуре, но и формировании волн тепла в сочетании с блокирующим антициклоном). Характер погоды в это время определялся блокирующим антициклоном, который обеспечил повышение температуры, застой воздушных масс, слабый приток чистого воздуха и низкую относительную влажность. Антропогенная нагрузка на окружающую среду также была выше, чем в 2020 г., ввиду смягчения жестких ограничений по COVID-19. В результате совокупности этих факторов в течение всего 2021 г., начиная с весенних месяцев, наблюдались ПКО выше обычного. В частности, общее время

превышения среднечасовыми ПКО значения ПДК<sub>мр</sub> составило 402 ч; максимальная за год среднечасовая ПКО — 482 мкг/м<sup>3</sup>; среднегодовая ПКО — 48 мкг/м<sup>3</sup>, усредненная за год максимальная суточная ПКО — 101 мкг/м<sup>3</sup>; P80(1h) = 157 мкг/м<sup>3</sup>. Для удобства сопоставления параметров 2020 и 2021 гг. данные сведены в таблицу.

**Характеристики временных рядов ПКО в Москве в 2020 и 2021 гг.**

Параметр	Год	
	2020	2021
Среднее за год, мкг/м <sup>3</sup>	28	48
Максимальное 60-минутное, мкг/м <sup>3</sup>	185	482
Среднее максимальное суточное 60-минутное, мкг/м <sup>3</sup>	55	101
P80(1h) годового ряда максимальных суточных 60-минутных значений, мкг/м <sup>3</sup>	76	157
Время превышения ПДК <sub>мр</sub> , ч	1	402

Необходимо отметить, что концентрации озона ~ 500 мкг/м<sup>3</sup> наблюдались в Москве последний раз в августе 2010 г., когда максимальная дневная температура превышала 42 °С [16, 23]. Атмосфере города в то лето была отягощена дымом лесных пожаров в Подмоскowie. Эти события разделяет 11 лет — интервал, близкий к длительности цикла солнечной активности. Подтверждение этой взаимосвязи требует дополнительных исследований.

## Заключение

В настоящей работе представлены результаты мониторинга приземного озона в атмосфере Москвы в 2020 и 2021 гг. в условиях ограничений экономической, транспортной и социальной активности, обусловленных пандемией COVID-19. Проведен сравнительный анализ динамики содержания озона в приземной атмосфере в течение этих двух лет, отличавшихся как метеорологическими условиями, так и уровнем антропогенной нагрузки на окружающую среду.

В течение всего 2020 г. в Москве наблюдался относительно низкий для мегаполиса уровень приземных концентраций озона. Среднегодовое значение составило 28 мкг/м<sup>3</sup>, а максимальное годовое — 185 мкг/м<sup>3</sup>. Это обусловлено сочетанием нежаркой дождливой погоды в течение весны и лета с низким содержанием загрязняющих веществ в атмосферном воздухе из-за введения режима строгих ограничений из-за пандемии. Летом 2021 г. в мегаполисе наблюдалось несколько волн сильной жары в условиях блокирующего антициклона, когда максимальные дневные температуры доходили до 35 °С. В сочетании с более высокой загрязненностью атмосферного воздуха по сравнению с предыдущим годом это стало причиной необычно высоких концентраций озона. Среднегодовое значение составило 48 мкг/м<sup>3</sup>, а максимальное годовое — 482 мкг/м<sup>3</sup>.

## Список литературы

1. Белан Б.Д. Озон в тропосфере. Томск: ИОА СО РАН, 2010. 487 с.
2. Исидоров В.В. Органическая химия атмосферы. СПб.: Химиздат, 2001. 237 с.
3. Blake A.J., Carver J.H. The evolutionary role of atmospheric ozone // J. Atmos. Sci. 1977. V. 34, N 5. P. 720–728.
4. Walker J.C.G. The early history of oxygen and ozone in the atmosphere // Pure Appl. Geophys. 1978. V. 117. P. 498–512.
5. Roshchina V.V., Roshchina V.D. Ozone and Plant Cell. Dordrecht: Kluwer, 2003. 240 p.
6. Пуцина В.В., Мельникова Е.В. Вклад озона и активных форм кислорода в развитие клеточных систем растений // Материалы междунар. конф. «Митохондрии, клетки и активные формы кислорода» / под ред. В.П. Скулачева, В.П. Зинченко. Пуцино: Биологический центр РАН, 2000. С. 127–129.
7. Roshchina V.V. Chapter 2. Evolutionary considerations of neurotransmitters in Microbial, Plant and Animal Cells // Microbial Endocrinology. Interkingdom Signaling in Infectious Disease and Health / M. Lyte, P.P.E. Freestone (eds.). New York, Berlin: Springer, 2010. P. 17–52.
8. Zanardi I., Borrelli E., Valacchi G., Travagli V., Bocci V. Ozone: A multifaceted molecule with unexpected therapeutic activity // Current Med. Chem. 2016. V. 23, N 4. P. 304–314.
9. Smith N.L., Wilson A.L., Gandhi J., Vatsia S., Ali-Khan S. Ozone therapy: An overview of pharmacodynamics, current research, and clinical utility // Med. Gas Res. 2017. V. 7, N 3. P. 212–219.
10. Zhang J., Wei Y., Fang Z. Ozone pollution: A major health hazard worldwide // Front. Immunol. 2019. V. 10. P. 2518.
11. Ebi K.L., McGregor G. Climate change, tropospheric ozone and particulate matter, and health impacts // Environ. Health Perspect. 2008. V. 116. P. 1449–1455.
12. Nuvolone D., Petri D., Voller F. The effects of ozone on human health // Environ. Sci. Pollut. Res. 2018. V. 25. P. 8074–88.
13. Koman P.D., Mancuso P. Ozone exposure, cardiopulmonary health, and obesity: A substantive review // Chem. Res. Toxicol. 2017. V. 30. P. 1384–1395.
14. Котельников С.Н. Основные механизмы взаимодействия озона с живыми системами и особенности проблемы приземного озона для России // Тр. Института общей физики им. А.М. Прохорова. Т. 71. Проблема тропосферного озона / под ред. Е.В. Степанова. М.: Наука, 2015. С. 10–41.
15. Turner M.C., Jerrett M., Pope III C.A., Krewski D., Gapstur S.M., Diver W.R., Beckerman B.S., Marshall J.D., Su J., Crouse D.L., Burnett R.T. Long-term ozone exposure and mortality in a large prospective study // Am. J. Respir. Crit. Care. Med. 2016. V. 193. P. 1134–1142.
16. Котельников С.Н., Степанов Е.В. Влияние приземного озона на здоровье населения // Тр. Института общей физики им. А.М. Прохорова. Т. 71. Проблема тропосферного озона / под ред. Е.В. Степанова. М.: Наука, 2015. С. 72–93.
17. Котельников С.Н., Степанов Е.В., Ивашкин В.Т. Приземные концентрации озона и здоровье различных возрастных групп населения в г. Москва летом 2010 г. // Изв. Геофизические процессы и биосфера. 2019. Т. 18, № 4, С.26–38.

18. *Dingenen R.V., Dentener F.J., Raes F., Krol M.C., Emberson L., Cofala J.* The global impact of ozone on agricultural crop yields under current and future air quality legislation // *Atmos. Environ.* 2009. V. 43. P. 604–618.
19. *Felzer B.S., Cronin T., Reilly J.M., Melillo J.M., Wang X.* Impacts of ozone on trees and crops // *Comptes Rendus Geosci.* 2007. V. 339. P. 784–798.
20. *Еланский Н.Ф., Смирнова О.И.* Концентрация озона и окислов азота в приземном воздухе г. Москвы // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 1997. Т. 33, № 5. С. 597–611.
21. *Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н.* Изменчивость приземного озона в окрестностях Москвы: результаты десятилетних регулярных наблюдений // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2002. Т. 38, № 4. P. 486–495.
22. *Звягинцев А.М., Беликов И.Б., Егоров В.И., Еланский Н.Ф., Крученицкий Г.М., Кузнецова И.Н., Николеева А.Н., Обухова З.В., Скороход А.И.* Положительные аномалии приземного озона в июне-августе 2002 г. в Москве и ее окрестностях // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2004. Т. 40, № 1. С. 75–86.
23. *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.
24. *Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Трифанова А.В., Беликов И.Б., Скороход А.И.* О содержании малых газовых примесей в приземном слое атмосферы над Москвой // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2015. Т. 51, № 1. С. 39–51.
25. *Adam M.G., Tran P.T.M., Balasubramanian R.* Air quality changes in cities during the COVID-19 lockdown: A critical review // *Atmos. Res.* 2021. V. 264. P. 105823.
26. *Agarwal A., Kaushik A., Kumar S., Kumar R.* Comparative study on air quality status in Indian and Chinese cities before and during the COVID-19 lockdown period // *Air Quality, Atmos. Health.* 2020.
27. *Yang M., Chen L., Msigwa G., Tang K.H.D., Poo-Seng Yap P.-S.* Implications of COVID-19 on global environmental pollution and carbon emissions with strategies for sustainability in the COVID-19 era // *Sci. Total Environ.* 2022. V. 809. P. 151657.
28. *Mertens M., Jöckel P., Matthes S., Nützel M., Volker Grewe V., Sausen R.* COVID-19 induced lower-tropospheric ozone changes // *Environ. Res. Lett.* 2021. V. 16, N 6. P. 064005.
29. *Bouarar I., Gaubert B., Brasseur G.P., Steinbrecht W., Doumbia T., Tilmes S., Liu Y., Stavrou T., Deroubaix A., Darras S., Granier C., Lacey F., Muller J.-F., Shi X., Elguindi N., Wang T.* Ozone anomalies in the free troposphere during the COVID-19 pandemic // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48, N 16. P. e2021GL094204.
30. *Peralta O., Ortíz-Alvarez A., Torres-Jardón R., Suárez-Lastra M., Castro T., Ruiz-Suárez L.G.* Ozone over Mexico City during the COVID-19 pandemic // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 20. P. 143183.
31. *Hashim B.M., Al-Naseri S.K., Al-Maliki A., Al-Ansari N.* Impact of COVID-19 lockdown on NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and PM<sub>10</sub> concentrations and assessing air quality changes in Baghdad, Iraq // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 754. P. 141978.
32. *He C., Hong S., Zhang L., Mu H., Xin A., Zhou Y., Liu J., Liu N., Su Y., Tian Ya, Ke B., Wang Y., Yang L.* Global, continental, and national variation in PM<sub>2.5</sub>, O<sub>3</sub>, and NO<sub>2</sub> concentrations during the early 2020 COVID-19 lockdown // *Atmos. Pollut. Res.* 2021. V. 12. P. 136–145.
33. *Siciliano B., Dantas G., da Silva C.M., Arbilla G.* Increased ozone levels during the COVID-19 lockdown: Analysis for the city of Rio de Janeiro, Brazil // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 737. P. 139765.
34. *Wang L., Li M., Yu S., Chen X., Li Z., Jiang L., Xia Y., Li J., Liu W., Li P., Lichtfouse E., Rosenfeld D., Seinfeld J.H.* Unexpected rise of ozone in urban and rural areas, and sulfur dioxide in rural areas during the coronavirus city lockdown in Hangzhou, China: Implications for air quality // *Environ. Chem. Lett.* 2020. V. 18. P. 1713–1723.
35. *Steinbrecht W., Kubistin D., Plass-Dülmer C., Davies J., Tarasick D.W., von der Gathen P., Deckelmann H., Jepsen N., Kivi R., Lyall N., Palm M., Nottholt J., Kois B., Oelsner P., Allaart M., Piders A., Gill M., Van Malderen R., Delcloo A.W., Sussmann R., Mahieu E., Servais C., Romanens G., Stibi R., Ancellet G., Godin-Beekmann S., Yamanouchi S., Strong K., Johnson B., Cullis P., Petropavlovskikh I., Hannigan J.W., Hernandez J.-L., Rodriguez A.D., Nakano T., Chouza F., Leblanc T., Torres C., Garcia O., Röhlings A.N., Schneider M., Blumenstock T., Tully M., Paton-Walsh C., Jones N., Querel R., Strahan S., Stauffer R.M., Thompson A.M., Inness A., Engelen R., Chang K.-L., Cooper O.R.* COVID-19 crisis reduces free tropospheric ozone across the Northern Hemisphere // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48, N 5. DOI: 10.1029/2020GL091987.
36. *Fu S., Guo M., Fan L., Deng Q., Han D., Wei Y., Luo J., Qin G., Cheng J.* Ozone pollution mitigation in guangxi (south China) driven by meteorology and anthropogenic emissions during the COVID-19 lockdown // *Environ. Pollut.* 2021. V. 272. P. 115927.
37. *Kotelnikov S.N., Stepanov E.V.* Anomalous dynamics of tropospheric ozone in the spring of 2020 in Central Russia // *Bull. Lebedev Phys. Inst.* 2021. V. 48, N 3. P. 92–96.
38. *Андреев В.В., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Демин В.И., Еланский Н.Ф., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Постыляков О.В., Савкин Д.Е., Сеник И.А., Степанов Е.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В., Челибанов И.В., Челибанов В.П., Широков В.В., Шукуров К.А.* Приземная концентрация озона на территории России во втором полугодии 2020 г. // *Оптика атмосфер. и океана.* 2021. Т. 34, № 4. С. 292–301; *Andreev V.V., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Elansky N.F., Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Kotelnikov S.N., Kuznetsova I.N., Lapchenko V.A., Lezina E.A., Postylyakov O.V., Savkin D.E., Senik I.A., Stepanov E.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V., Chelibanovi I.V., Chelibanov V.P., Shirokov V.V.* Surface Ozone concentration over Russian territory in the first half of 2020 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 6. P. 671–681.
39. *Гидрометцентр России.* М., 2022. URL: <https://meteoinfo.ru/> (дата обращения: 12.04.2022).
40. *Андреев В.В., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Демин В.И., Дудорова Н.В., Еланский Н.Ф., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Оболкин В.А., Постыляков О.В., Потемкин В.Л., Савкин Д.Е., Сеник И.А.,*



- Степанов Е.В., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В., Ходжер Т.В., Челибанов И.В., Челибанов В.П., Широшов В.В., Шукуров К.А. Концентрация тропосферного озона на территории России в 2021 г. // Оптика атмосф. и океана. 2022. Т. 35, № 7. С. 559–571.
41. Челибанов В.П., Котельников С.Н., Смирнов Н.В., Ясенко Е.А. Перспектива применения программно-аппаратного комплекса ПАЕ-8816 при построении глобальной системы мониторинга атмосферного воздуха // Биосфера. 2015. Т. 7, № 1. С. 119–123.
42. Котельников С.Н., Степанов Е.В. Мониторинг тропосферного озона в атмосфере мегаполисов и малоурбанизированных районов // Тр. Института общей физики им. А.М. Прохорова. Т. 71. Проблема тропосферного озона / под ред. Е.В. Степанова. М.: Наука, 2015. 189 с.
43. Kotelnikov S.N., Stepanov E.V. Positive trend of surface ozone in the north of the Privolzhskii Federal Region of the Russian Federation // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2019. V. 45. P. 24–28.

*E.V. Stepanov, V.V. Andreev, L.V. Konovaltseva, S.G. Kasoev. Surface ozone over Moscow during the COVID-19 pandemic.*

The results of surface ozone monitoring in the atmosphere of Moscow in 2020 and 2021 under lockdown associated with the COVID-19 pandemic are presented. These two years significantly differed in meteorological conditions and the level of anthropogenic impact on the environment. A relatively low for metropolis concentrations of surface O<sub>3</sub> were observed in Moscow in 2020. The annual average value was 28 µg/m<sup>3</sup>, and the annual maximum was 185 µg/m<sup>3</sup>. That was due to a combination of relatively cool weather with low levels of pollutants in the air. Several intense heat waves were observed in the metropolis under conditions of a blocking anticyclone during summer 2021, daytime temperatures rose to 35 °C. Along with higher air pollution, that resulted in unusually high O<sub>3</sub> concentrations. The annual average value was 48 µg/m<sup>3</sup>, and the annual maximum was 482 µg/m<sup>3</sup>.