

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.510.42

Приземная концентрация озона на территории России во втором полугодии 2020 г.

В.В. Андреев¹, М.Ю. Аршинов², Б.Д. Белан², С.Б. Белан², Д.К. Давыдов²,
В.И. Демин³, Н.Ф. Еланский⁴, Г.С. Жамсуева⁵, А.С. Заяханов⁵, Г.А. Ивлев²,
А.В. Козлов², С.Н. Котельников⁶, И.Н. Кузнецова⁷, В.А. Лапченко⁸,
Е.А. Лезина⁹, О.В. Постыляков⁴, Д.Е. Савкин², И.А. Сеник⁴, Е.В. Степанов⁶,
Г.Н. Толмачев², А.В. Фофонов², И.В. Челибанов¹⁰, В.П. Челибанов¹⁰,
В.В. Широтов¹¹, К.А. Шукров^{4*}

¹ Российский университет дружбы народов
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

² Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

³ Полярный геофизический институт РАН
184209, г. Апатиты, Академгородок, 26а

⁴ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3, стр. 1

⁵ Институт физического материаловедения СО РАН
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

⁶ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 38

⁷ Гидрометцентр России

123242, г. Москва, Большой Предтеченский пер., 11–13

⁸ Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН –
филиал Института биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН
298188, г. Феодосия, п.г.т. Курортное, ул. Науки, 24

⁹ Мосэкомониторинг

119019, г. Москва, ул. Новый Арбат, 11, стр. 1

¹⁰ Приборостроительное предприятие «ОПТЭК»
199178, г. Санкт-Петербург, Малый проспект В.О., 58

¹¹ НПО «Тайфун»
249038, г. Обнинск, Калужская обл., ул. Победы, 4

Поступила в редакцию 25.02.2021 г.

Приводятся сведения о концентрации озона в приземном слое воздуха во втором полугодии 2020 г. Даные получены на 13 станциях, расположенных в разных регионах России. Выполнена оценка превышения гигиенических нормативов, установленных в РФ, как во втором полугодии, так и в целом за 2020 г. Показано, что среднесуточная предельно допустимая концентрация озона регулярно превышается на всех станциях. Имеются случаи превышения максимальной разовой предельно допустимой концентрации.

Ключевые слова: атмосфера, воздух, концентрация, озон, предельно допустимая концентрация, приземный слой; atmosphere, air, concentration, ozone, maximum permissible concentration, surface layer.

Введение

Настоящая статья продолжает цикл публикаций, нацеленных на информирование научной общественности о содержании озона в приземном слое

воздуха на территории России (рассматривается второе полугодие 2020 г.). Необходимость такого информирования обусловлена тем, что озон в тропосфере представляет огромную опасность как для биологических объектов, так и объектов окружающей среды.

* Виктор Викторович Андреев (vvandreev@mail.ru);
Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Сергей Борисович Белан (bsb@iao.ru); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru);

Валерий Иванович Демин (demin@pgia.ru); Николай Филиппович Еланский (n.f.elansky@mail.ru); Галина Санжиевна Жамсуева (galinazham@gmail.com); Александр Савельевич Заяханов (lmza@mail.ru); Георгий Алексеевич Ивлев

При этом мониторинг его концентрации на государственном уровне не организован. Население лишено информации и, следовательно, возможности реагирования на превышение предельно допустимой концентрации (ПДК) озона. Медицинские работники не знают о специфическом воздействии озона на человека и не обладают методами нейтрализации такого воздействия.

В рассматриваемом в настоящем обзоре периоде можно выделить две особенности. Первая связана с пандемией коронавируса, борьба с которой привела к снижению экономической деятельности и, следовательно, к сокращению антропогенных выбросов и очищению воздуха в городах. Вторая заключается в том, что 2020 г. стал самым теплым на Земле за весь период наблюдений [1]. И это при том, что в Тихом океане развивалось явление Ла-Нинья, обладающее охлаждающим эффектом для планеты. Однако, как считает научное сообщество, пандемия не отменила, а лишь задержала реализацию мер по смягчению последствий для окружающей среды от глобального потепления [2–4].

Как показали многочисленные исследования, локдаун, приведший к уменьшению экономической активности населения, действительно снизил уровень загрязнения воздуха в целом ряде городов. По данным [5], в Дели, Мумбае, Ченнае, Калькуте и Бангкоке в марте – апреле 2020 г. концентрация $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 и CO снижалась на 41, 52, 51 и 28% соответственно. В Центральной Европе концентрации NO , NO_2 , CO и общее число частиц диаметром < 100 нм уменьшились на 68, 46, 27 и 28% в 2020 г. по отношению к среднему ориентиру (2017–2019 гг.) [6]. По данным [7], в Москве снижение уровня основных загрязняющих веществ в атмосфере в период ограничительных мер составило 30–50%.

Несмотря на снижение концентрации газов-предшественников, содержание озона при этом возрастило. В [8] отмечен его рост на 69,7% в Шеньяне (Китай), в [9] – на 42% в Великобритании, в [10] – от 14 до 27% в европейских городах. Такой эффект вполне закономерен, так как нарушается баланс равновесия триады $\text{NO} - \text{O}_2 - \text{NO}_2$ [11, 12].

Авторы [13] высказали гипотезу о том, что озон может влиять на распространение самого коронавируса. Проведенный ими регрессионный анализ показал, что распространение SARS-CoV-2 уменьшалось при повышении концентрации озона с 48 до 94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ с уровнем значимости 0,04. Правда, других подобных исследований обнаружить не удалось.

Конечно, на уровень содержания озона в атмосфере в 2020 г. влиял не только локдаун, вводимый из-за коронавируса. Происходили атмосферные

(ivlev@iao.ru); Артем Владимирович Козлов (artem@iao.ru); Сергей Николаевич Котельников (skotelnikov@mail.ru); Ирина Николаевна Кузнецова (labmuza@mail.ru); Владимир Александрович Лапченко (ozon.karadag@gmail.com); Елена Александровна Лезина (LezinaEA@eco.mos.ru); Олег Вадимович Постыляков (oleg.postylyakov@gmail.com); Денис Евгеньевич Савкин (sde@iao.ru); Ирина Анатольевна Сеник

процессы, в ходе которых озон мог образоваться или погибнуть. Это нашло отражение в [14], где показано, что не во всех городах с введением локдауна наблюдалось снижение уровня загрязнения воздуха и увеличение образования озона.

Поскольку концентрация озона в приземном слое воздуха в многолетнем ходе может изменяться в несколько раз, при оценке последствий от локдауна надо учитывать имеющиеся тренды. Сложившийся для подготовки обзоров консорциум организаций пока не имеет длинных рядов приземной концентрации озона. Поэтому отдельной задачи по отражению последствий локдауна в настоящем обзоре не ставилось. Возможно, мы вернемся к этому вопросу в следующих публикациях, после накопления необходимого количества измерений.

Описание станций и используемых приборов

Полный перечень станций и оборудования, установленного на них, а также описание режима работы и калибровок были даны в [15]. Здесь приведем описание ст. Апатиты и Боярск, которые не входили в предыдущий обзор.

Измерения озона в г. Апатиты Мурманской обл. осуществляются на территории района Академгородок, значительная часть которого представляет собой парковую зону. Координаты поста $67^{\circ}34'14''$ с.ш., $33^{\circ}23'51''$ в.д., высота н. у. м. – 180 м. В качестве измерительного прибора используется УФ-озонометр Dasibi 1008-АН. Измерения проводятся с минутным временным разрешением. Воздух отбирается на высоте 15 м от поверхности земли. Данные о приземной концентрации озона (ПКО) в регионе дополняются сериями измерений в фоновых районах, которые в настоящее время не носят регулярного характера. Для этих целей используется электрохимический озонометр. Описание прибора и его метрологические характеристики приведены в [16].

Станция мониторинга «Боярский» расположена в Республике Бурятия, на юго-восточном побережье оз. Байкал. Ее координаты $51^{\circ}51'10''$ с.ш., $106^{\circ}02'28''$ в.д., высота н. у. м. – 516 м. Для района характерны большие контрасты температур между озером и прилегающей территорией, которые усиливаются за счет закрытого положения Байкала, окруженного со всех сторон горными хребтами. Температурный градиент между озерной впадиной и сопредельными сухими котловинами, достигающий 20 °C и более, является одним из основных факторов образования и развития внутрикотловинной

(senik_ia@list.ru); Евгений Валерьевич Степанов (Eugene-Stepanov@yandex); Геннадий Николаевич Толмачев (tgn@ipc.tsc.ru); Александр Владиславович Фофанов (alenfo@iao.ru); Иван Владимирович Челибанов (ichelibanov@gmail.com); Владимир Петрович Челибанов (chelibanov@gmail.com); Вадим Викторович Широтов (shirotov@rpatyphoon.ru); Карим Абдухакимович Шукuroв (karim.shukurov@ifaran.ru).

циркуляции и ее распространения на акваторию озера, что часто способствует накоплению атмосферных примесей. Можно считать, что с. Боярск слабо подвержено антропогенному воздействию. Некоторое влияние могут оказывать небольшие промышленные центры: г. Бабушкин, расположенный на удалении 22 км, пос. Каменск – 50 км и пос. Селенгинск – 60 км. В непосредственной близости имеется смешанный лес (береза, сосна, кедр). На станции расположена 30-метровая мачта. Забор воздуха для определения концентрации приземного озона проводится на высотах 2 и 20 м от поверхности земли через тефлоновые трубы. Измерения осуществляются хемилюминесцентными газоанализаторами 3.02 П-А. Калибровка и установка нуля производятся автоматически при помощи встроенных источников озона по командам процессора газоанализаторов. Дополнительно для контроля погрешности измерений периодически осуществлялось тестирование газоанализатора с помощью калибратора Mod. 8500 Monitor Labs. На этих же

высотах проводятся метеорологические наблюдения акустическими метеокомплексами АМК-03, ЭКСМЕТО.

Пандемия коронавируса нанесла вред не только здоровью населения, но и многим производственным процессам, в том числе и наблюдениям за состоянием окружающей среды, причем в некоторых случаях очень существенный [17]. Ограничения, связанные с пандемией, отразились и на измерениях озона, проводимых в России. Несколько станций, вошедших в предыдущий обзор, были закрыты, а некоторые смогли работать только в отдельные периоды, когда снимались ограничения.

Результаты измерений

Анализ начнем с городских станций, расположенных на территориях с большей плотностью населения (рис. 1). Все городские станции отражают классический годовой ход озона, а именно убывание концентрации от лета к зиме.

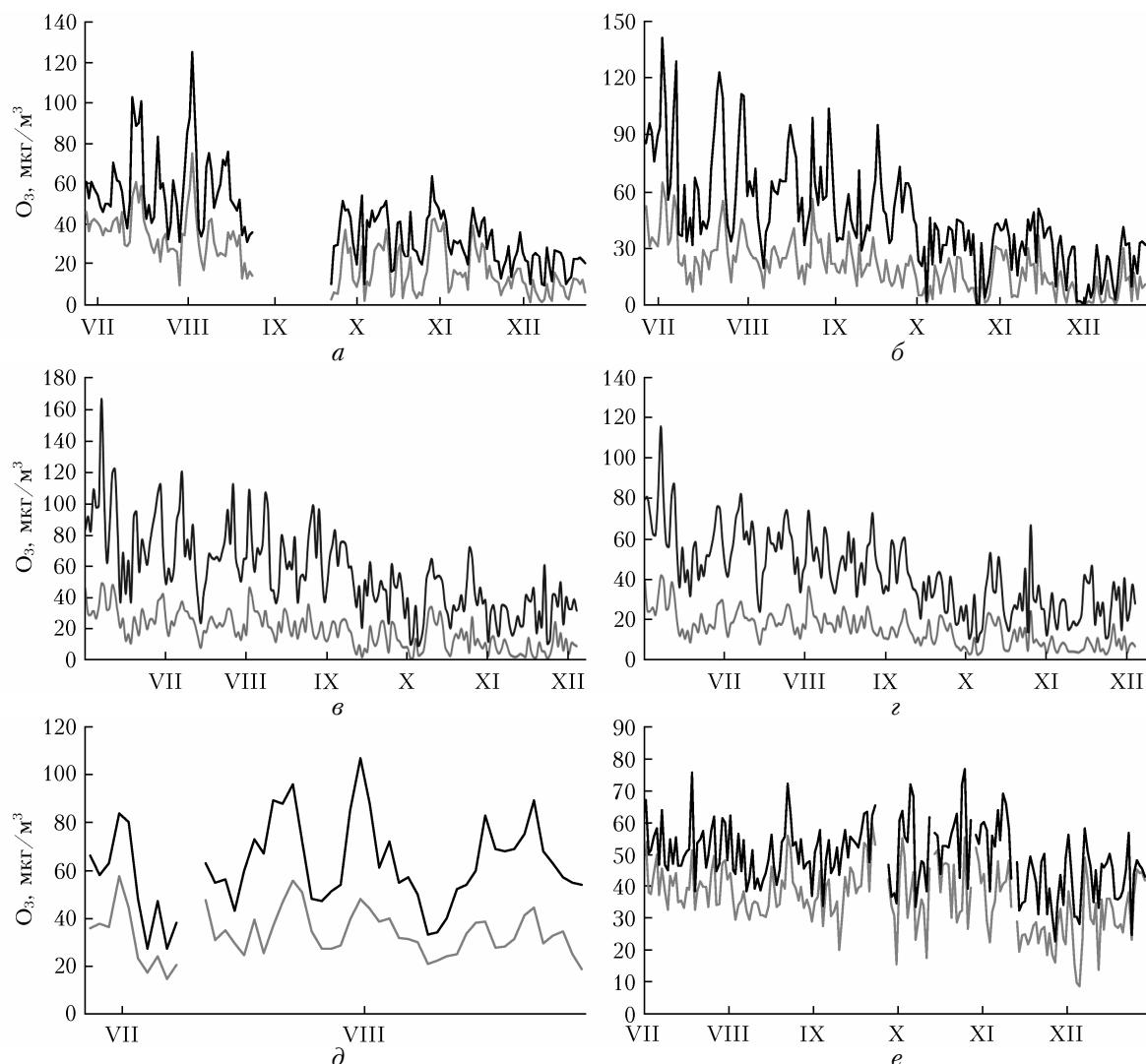


Рис. 1. Среднесуточные (серая кривая) и максимальные за день (черная кривая) концентрации озона в приземном слое воздуха на станциях: *a* – ОПТЕС-Р; *б* – РУДН; *в* – городские станции Москвы; *г* – примагистральные станции Москвы; *д* – Обнинск; *е* – Апатиты

В Москве функционирует региональная сеть экологического мониторинга Государственного природоохранного бюджетного учреждения (ГПБУ) «Мосэкомониторинг» — специально уполномоченной организации г. Москвы по осуществлению государственного экологического мониторинга [18]. В настоящем обзоре представлены данные, осредненные по измерениям на станциях городского и примагистрального типов [19]. В анализ не включены данные пригородных пунктов, а также поста в природном заповеднике «Лосинный остров».

На рис. 1, *в*, *г* приведены осредненные по территории данные с семи станций городского типа и пяти — примагистрального. Во втором полугодии происходило естественное уменьшение содержания озона в толще атмосферы и в приземном воздухе; сезонное убывание озона завершилось формированием в декабре годового минимума ПКО. Средняя за месяц ПКО от июля к декабрю уменьшилась в 3–4 раза: в жилых районах — с 30 до 8 $\text{мкг}/\text{м}^3$, на придорожной территории — с 23 до 7 $\text{мкг}/\text{м}^3$. При этом средняя за месяц ПКО в августе и сентябре оказалась меньше средних многолетних величин концентрации на 5–10 $\text{мкг}/\text{м}^3$.

Из-за погодных аномалий (преобладание облачной погоды с частыми дождями), препятствовавших активной фотохимической генерации озона, летний максимум приземного озона, чаще всего наблюдающийся в июле — августе, практически не сформировался. Как было отмечено в [15], значительно ослабленным оказался и главный годовой (апрельский) максимум ПКО в первую очередь из-за аномально холодной и дождливой погоды весной в Москве и в меньшей степени — из-за резкого снижения выбросов в атмосферу загрязняющих веществ в период ограничительных мер.

Единственный в году зафиксированный на станциях «Мосэкомониторинга» озоновый эпизод имел место 7 июля. Резкое увеличение озона произошло в послеполуденные часы при повышении дневной температуры до +30 °С. На одной станции городского типа (АСКЗА «Марьино») ПКО достигла 167 $\text{мкг}/\text{м}^3$.

Характерные особенности временного хода ПКО, зарегистрированного на станции мониторинга РУДН (рис. 1, *б*), расположенной в пределах московского Третьего транспортного кольца, практически совпадают с данными, полученными на станциях «Мосэкомониторинга» (рис. 1, *в* и *г*). Наблюдаются лишь небольшие различия в размахе пиков в амплитудах дневных максимальных значений ПКО, что можно объяснить спецификой расположения станций и локальными особенностями.

В малых городах, Обнинске и Апатитах, концентрации озона были заметно ниже (рис. 1, *д* и *е*), чем в мегаполисах — Москве и Санкт-Петербурге (рис. 1, *а*—*г*). В рассматриваемый период наблюдавшиеся в Апатитах ПКО очень далеки от предельно допустимых максимальных разовых концентраций ($\text{ПДК}_{\text{м.р.}} = 160 \text{ мкг}/\text{м}^3$). Наибольшие значения ПКО были зарегистрированы 26 октября и составили всего 81 $\text{мкг}/\text{м}^3$. Средние максимальные ПКО в июле, на который приходятся наиболее высокие темпера-

туры и продолжительный период солнечной инсоляцией (с 29 мая по 14 июля в регионе полярный день), составили 53 $\text{мкг}/\text{м}^3$, а в декабре — в период с минимальным освещением и полярной ночью (с 15 по 27 декабря) — 43 $\text{мкг}/\text{м}^3$. Это ниже, чем средние многолетние значения, соответственно, на 5 и 15 $\text{мкг}/\text{м}^3$. Однако по многолетним измерениям максимальные ПКО в эти периоды, сильно отличающиеся по метеорологическим характеристикам и уровню УФ-радиации, обычно оказываются практически одинаковыми. В частности, многолетние средние максимальные ПКО в Апатитах с 1 по 14 июля (полярный день) составляют 58 $\text{мкг}/\text{м}^3$, а с 12 по 27 декабря (полярная ночь) — 56 $\text{мкг}/\text{м}^3$.

Пять станций относятся к фоновым: ОРТЕС-PR, СФЭМ «Карадаг», Вятские Поляны, «Боярский» и обсерватория «Фоновая». Данные измерений на этих станциях представлены на рис. 2.

Из рисунка видно, что временной ход концентрации озона на них имеет свои особенности. Так, например, Вятские Поляны и «Фоновая» (рис. 2, *в* и *д*) фиксируют минимум концентраций не в декабре, что было бы логично, а в октябре. Насколько такой факт закономерен, пока сказать трудно. Возможно, это аномалии одного года.

В сезонном ходе ПКО на СФЭМ «Карадаг» отмечены весенний и летний максимумы в мае и августе 2020 г. (142 и 143 $\text{мкг}/\text{м}^3$). Минимальные среднемесячные значения наблюдались в ноябре и декабре 2020 г. (37 и 31 $\text{мкг}/\text{м}^3$). Максимальная среднечасовая ПКО была зарегистрирована 31 августа в 18:00 и составила 143 $\text{мкг}/\text{м}^3$ при температуре воздуха 28,3 °С и влажности 44%. Минимальная среднечасовая ПКО во втором полугодии 2020 г. была отмечена 19 декабря — 7 $\text{мкг}/\text{м}^3$ при температуре воздуха 4,0 °С и влажности воздуха 84%. В течение этого дня шел мелкий дождь — выпало 2,1 мм осадков. Анализ показал, что в летний период максимальная ПКО наблюдалась при юго-восточном и южном направлениях ветра. Относительно расположения СФЭМ «Карадаг» — это перенос со стороны моря.

Ход концентраций озона на СФЭМ «Карадаг» в значительной степени, особенно в теплый сезон, определяется ходом метеорологических параметров, в первую очередь температуры. Интенсивная фотохимическая генерация озона наблюдается при благоприятном сочетании метеорологических условий и соотношении концентраций NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$) и летучих органических соединений (ЛОС). Такие условия возникают на Карадаге при высокой солнечной облученности в жаркое время года. Образование достаточных для генерации озона концентраций ЛОС происходит, по-видимому, за счет естественных источников (повышенных выделений растениями при высокой температуре) и/или дальнего переноса [20].

По данным измерений на шести станциях (как городских, так и фоновых): Вятские поляны, Апатиты, ОРТЕС-Р, ОРТЕС-PR, Карадаг и ТОР-станция, — 9–10, 15 и 21–22 августа 2020 г. фиксировалось непродолжительное, но существенное повышение концентраций приземного озона. Вероятно,

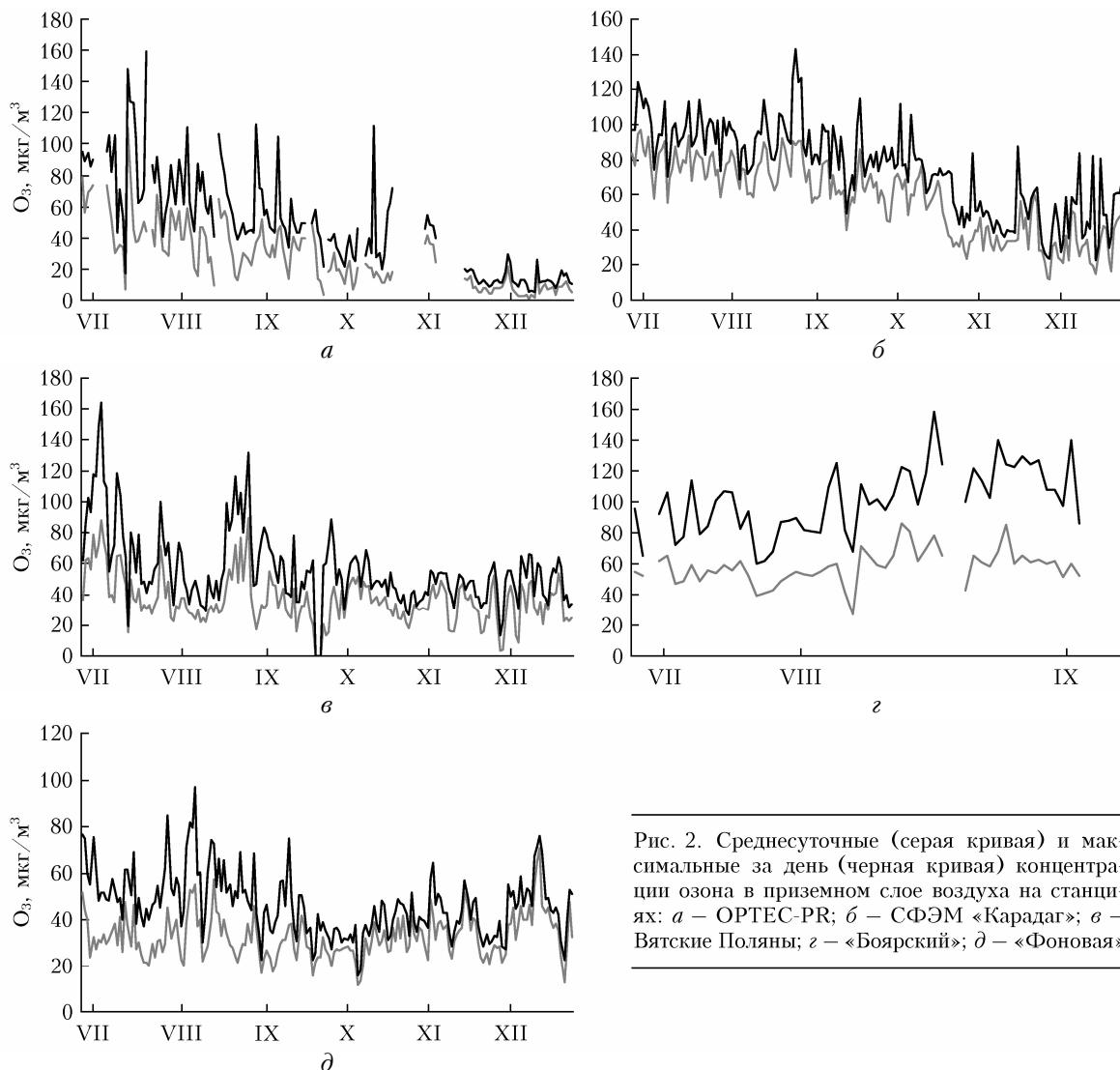


Рис. 2. Среднесуточные (серая кривая) и максимальные за день (черная кривая) концентрации озона в приземном слое воздуха на станциях: *a* – ОРТЕС-ПР; *б* – СФЭМ «Карадаг»; *в* – Вятские Поляны; *г* – «Боярский»; *д* – «Фоновая»

это было результатом эпизодического уменьшения общего содержания озона («озоновая аномалия») в Северном полушарии в этот период [21], что привело к росту УФ-радиации. Таким образом, увеличение ПКО происходило в ходе вторичных фотохимических реакций с участием прекурсоров озона – загрязнителей атмосферного воздуха – при увеличении интенсивности УФ-радиации.

В отличие от городских станций (см. рис. 1) фоновые (рис. 2) показывают большую и более разнообразную временную динамику концентрации озона и во втором полугодии 2020 г. Это, по-видимому, отражает повышенные концентрации легколетучих органических соединений, выбрасываемых растительностью лесных массивов окружающих станций [22, 23].

Обратимся к оставшейся пригородной станции – TOR-станции в Томске. Теоретически по своему местоположению она должна представлять промежуточную картину между городскими и фоновыми условиями. Данные измерений TOR-станции приведены на рис. 3.

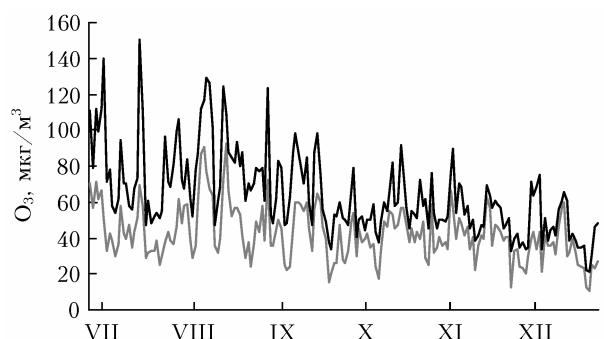


Рис. 3. Среднесуточные (серая кривая) и максимальные за день (черная кривая) концентрации озона в приземном слое воздуха на TOR-станции

Поскольку между TOR-станцией и обсерваторией «Фоновая» расстояние небольшое (60 км), характер временной динамики концентрации озона на обеих станциях подобен (рис. 2, *д* и рис. 3). Но имеются и различия. Они заключаются в более высоких среднесуточных и максимальных концен-

трациях на пригородной станции. Очевидно, что, находясь периодически в шлейфе выбросов г. Томска, где имеется дополнительное количество газов-предшественников озона, TOR-станция фиксирует более высокие концентрации.

Особое место занимает высокогорная станция КВНС (Кисловодск) (рис. 4). От всех высокогорных станций ее отличают удачная топография и умеренный климат, которые обеспечивают ее нахождение большую часть времени в воздухе, относящемся к свободной атмосфере.

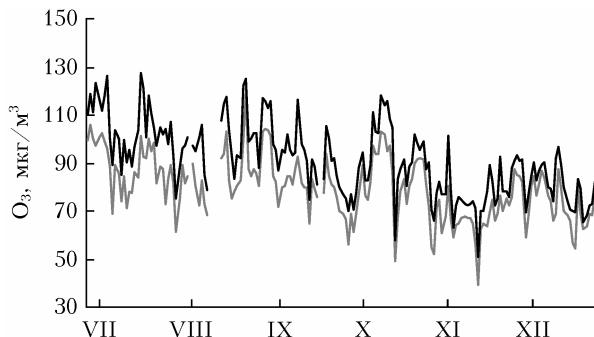


Рис. 4. Среднесуточные (серая кривая) и максимальные за день (черная кривая) концентрации озона в приземном слое воздуха на ст. Кисловодск

Изменчивость приземного содержания озона на КВНС в 2020 г. в общих чертах следовала выявленным по предшествующим наблюдениям особенностям: в сезонном ходе наблюдаются два локальных максимума (весной и летом) и минимум (осенью и зимой) [24]. Годовой абсолютный максимум озона в 2020 г. пришелся на март: с 8 по 11 марта среднечасовые значения неоднократно превышали $120 \text{ мкг}/\text{м}^3$ (см. рис. 4 [15]) и достигали максимальных за год значений $150 \text{ мкг}/\text{м}^3$. Это обусловлено переносом воздуха из вышележащих слоев, что сопровождалось повышением концентрации озона в приземном слое, понижением влажности и увеличением ветра. Кроме орографических эффектов, нельзя исключать дальний перенос южного направления, который рассмотрен ниже. В период вторичного летнего максимума превышение уровня $120 \text{ мкг}/\text{м}^3$ зарегистрировано 4, 8, 20 июля и 27 августа.

Наблюдающиеся на КВНС внутрисуточные вариации содержания озона существенно меньше, чем на равнинных станциях: амплитуда суточного хода даже летом не больше $10 \text{ мкг}/\text{м}^3$, с минимумами в середине дня и повышенными значениями ночью (приземная атмосфера пополняется озоном за счет переноса со стороны гор, из верхних слоев свободной тропосферы, в том числе в результате действия горно-долинной циркуляции). Летом суточный максимум иногда наблюдался в дневное время (возможно, влияли ЛОС и сенокосилки в дни покоса травы на лугах).

Для рассмотрения вклада дальнего переноса в наблюдаемые экстремальные значения приземного озона был выполнен траекторийный анализ приходивших на КВНС воздушных масс. Они рассчитывались с помощью траекторно-дисперсионной модели

NOAA HYSPLIT_4 (HYbrid Single-Partical Lagrangian Integrated Trajectory) [25, 26] и глобального архива реанализа метеоданных NCEP/NCAR Reanalysis [27, 28]. Траектории оканчивались в приповерхностном слое толщиной 100 м над КВНС. Всего для всех моментов измерений приземного озона в 2020 г. на КВНС было смоделировано ~ 24000 обратных траекторий.

Анализ обратных траекторий показывает, что высокие среднечасовые концентрации ($> 120 \text{ мкг}/\text{м}^3$) связаны с приходом богатого озоном воздуха свободной тропосферы с высот до 400 мб (рис. 5, а).

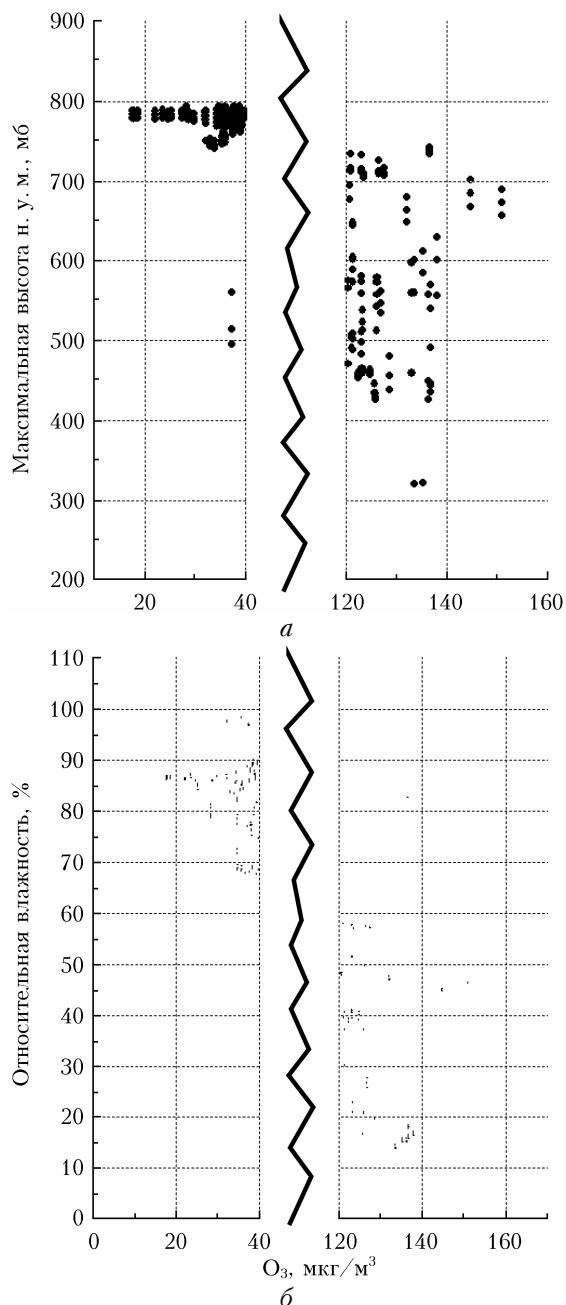


Рис. 5. Станция КВНС: а — максимальная высота траектории элементарной воздушной массы; б — относительная влажность воздуха для экстремальных значений приземного озона в 2020 г.

Средняя высота траекторий при этом составляла 600 мб. Для этих случаев характерна низкая влажность воздуха, до 15%.

Низкие среднечасовые содержания озона ($< 40 \text{ мкг}/\text{м}^3$) на КВНС были зарегистрированы в условиях высокой относительной влажности ($> 70\%$, рис. 5, б) и совпадают с локальной причиной — туманами («низкой», «наземной» облачностью). Траекторный анализ также показывает, что воздух при этом поступает из долины: максимальная высота соответствующих траекторий в 2020 г. составляла 750–800 мб (рис. 5, а), а средняя высота траекторий — 800–1000 мб. Низкие значения приземного озона в условиях высокой влажности в плотном тумане (обычно более 85%) не характеризуют региональное поле озона, поскольку облако является локальным «регулятором» концентрации озона.

Из всего рассчитанного массива траекторий было отобрано два набора траекторий, соответствующих экстремальным отрицательным и экстремальным положительным аномалиям озона, соответственно, первого и последнего децилей функции распределения аномалий O_3 , рассчитанных относительно аппроксимирующего полинома 2-й степени. С использованием методики [29] для экстремальных аномалий O_3 обоих знаков были восстановлены поля вероятности переноса элементарных воздушных масс (air particles) из пространственных ячеек размером $1^\circ \times 1^\circ$ к КВНС. На рис. 6 показана среднегодовая

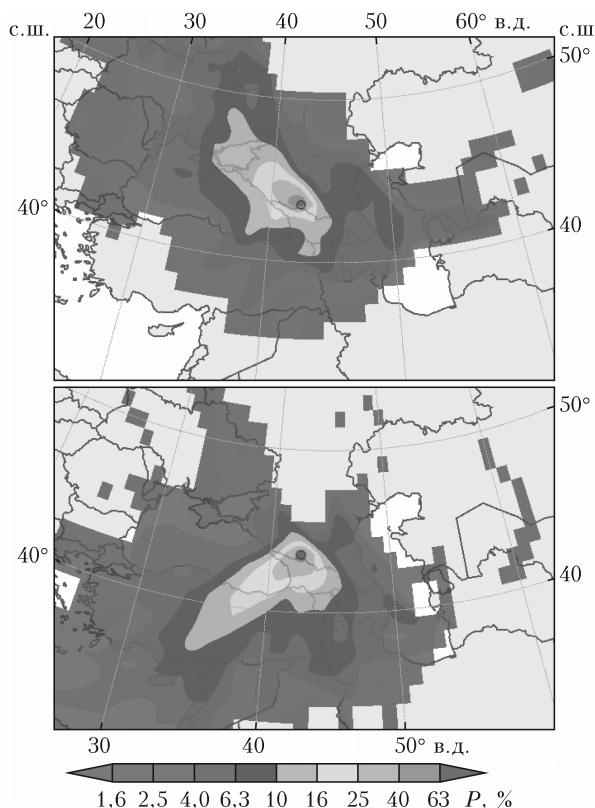


Рис. 6. Вероятность (P) прохождения элементарных воздушных масс, связанных с 10% самых низких (вверху) и 10% самых высоких (внизу) аномалий концентрации приземного озона на КВНС в 2020 г., над различными территориями

вероятность переноса элементарных воздушных масс для экстремально высоких и экстремально низких аномалий озона на КВНС.

Как видно из рис. 6, области наиболее вероятного переноса элементарных воздушных масс для экстремальных аномалий обоих знаков, во-первых, имеют выделенные направления и, во-вторых, пересекаются только в малой области вблизи станции, что может свидетельствовать о связи экстремальных концентраций озона на КВНС с горизонтальной адвекцией воздуха. В противном случае, например при наличии мощного местного источника или стока озона, распределения вероятности переноса в пространстве были бы равномерными для экстремумов аномалий обоих знаков. Согласно рис. 6 экстремально низкие концентрации озона в 2020 г. статистически связаны с переносом из районов Краснодарского края, экстремально высокие — с переносом из районов Закавказья и Турции через Главный Кавказский хребет.

Соответствие гигиеническим нормативам

В Российской Федерации установлены следующие гигиенические нормативы для концентрации озона в приземном слое воздуха [30, 31]: среднесуточная предельно допустимая концентрация ($\text{ПДК}_{\text{с.с.}}$) — $0,03 \text{ мг}/\text{м}^3$, или $30 \text{ мкг}/\text{м}^3$; максимальная разовая допустимая концентрация ($\text{ПДК}_{\text{м.р.}}$) — $0,16 \text{ мг}/\text{м}^3$, или $160 \text{ мкг}/\text{м}^3$; предельно допустимая концентрация вредного вещества в воздухе рабочей зоны ($\text{ПДК}_{\text{р.з.}}$) — $0,1 \text{ мг}/\text{м}^3$, или $100 \text{ мкг}/\text{м}^3$.

Опираясь на указанные стандарты, мы составили табл. 1, в которой собраны случаи превышения перечисленных выше ПДК.

Из данных табл. 1 следует, что в соответствии с отечественным нормативом во всех рассматриваемых пунктах во втором полугодии 2020 г. сохранился повышенный фон концентрации озона в приземном слое воздуха. Хотя превышение наблюдалось существенно реже, чем в первом полугодии [15]. Особенно снизилось содержание озона на городских станциях Москвы. Стало редким и превышение 2ПДК, не считая высокогорную КВНС, где влияние оказывает свободная тропосфера; 50% дней с концентрацией 2ПДК_{с.с.} отмечается на Карадаге. В Томской обл., Санкт-Петербурге, Карадаге и КВНС зафиксированы случаи превышения 3ПДК_{с.с.}.

Удивительно, но, как видно из табл. 1, достаточно высокой во втором полугодии 2020 г. осталась повторяемость превышения ПДК рабочей зоны. Только на четырех пунктах из 13 не зафиксировано $\text{ПДК}_{\text{р.з.}} > 100 \text{ мкг}/\text{м}^3$.

В отличие от первого полугодия максимальная разовая ПДК в рассматриваемый период была превышена всего по одному разу в двух пунктах.

В связи с наблюдаемыми [32] и прогнозируемыми [33] увеличением концентрации озона в приземном слое воздуха необходимы значительные усилия по уменьшению выбросов его газов-предшественников.

Таблица 1

Превышение предельно допустимых концентраций озона в приземном слое воздуха на территории России во втором полугодии 2020 г. (дни/%)

Станция	ПДК _{с.с.} (30 мкг/м ³)			ПДК _{р.з.} (100 мкг/м ³)	ПДК _{м.р.} (160 мкг/м ³)
	1ПДК	2ПДК	3ПДК		
OPTEC-PR	67/44	10/6,5	1/0,7	12	0
OPTEC-P	49/31	2/1,3	0/0	3	0
СФЭМ «Карадаг»	162/88	92/50	9/4,8	27	0
Обнинск	30/60	0/0	0/0	1	0
РУДН	32/17	1/05	0/0	26	
Москва городские	30/16	0/0	0/0	0/0	1
Москва примагистральные	8/4	0/0	0/0	0/0	0
КВНС	178/100	168/94	35/20	49	0
Вятские Поляны	118/65	15/8	0/0	13	1
TOR-станция	150/82	18/10	2/1,1	15	0
«Фоновая»	100/54	2/1,1	0/0	0	0
«Боярский»	54/100	20/37	0/0	27	0
Апатиты	133/75	0/0	0/0	0	0

Тем более что положительные результаты от снижения их количества в некоторых регионах есть [34]. Нельзя забывать и о суммировании воздействия озона на здоровье населения при одновременном превышении ПДК другими соединениями или усиливении его действия при тепловых волнах [35, 36].

На девяти станциях измерения озона проводились в течение всего года (табл. 2).

Таблица 2

Превышение предельно допустимых концентраций озона в приземном слое воздуха на территории России за год (дни/%)

Станция	ПДК _{с.с.}			ПДК _{р.з.}	ПДК _{м.р.}
	1ПДК	2ПДК	3ПДК		
OPTEC-PR	201/70	116/40	26/9,1	25	2
OPTEC-P	72/21	4/1,2	0/0	3	0
СФЭМ					
«Карадаг»	341/93	212/58	26/7,1	56	0
Обнинск	168/77	15/7	0/0	1	0
РУДН	142/42	10/2,9	0/0	42	1
КВНС	347/100	168/96	70/20	59	0
Вятские Поляны	118/82	82/23	0/0	27	1
TOR-станция	331/90	59/16	18/4,9	60	1
«Фоновая»	281/77	50/14	0/0	0	0

Данные табл. 2 показывают, что превышение ПДК_{с.с.} может наблюдаться во всех регионах, где проводился мониторинг. Если не брать в расчет КВНС как особую станцию, то повторяемость среднесуточных концентраций 30 мкг/м³ и более лежит в пределах 21–90%. Концентрации 60 мкг/м³ и более также наблюдаются во всех районах, их повторяемость изменяется от 1,2 до 58%. Также почти во всех районах фиксируется превышение ПДК_{р.з.}. В пяти районах имеется превышение ПДК_{м.р.}.

Заключение

Проведенный обзор показывает, что на территории России концентрация озона в приземном слое воздуха во втором полугодии 2020 г. в большинстве

пунктов превышает отечественные гигиенические нормативы. Это требует проведения более полного анализа озонаобразующих веществ и разработки мероприятий по уменьшению их поступления в атмосферу.

Очевидна также мозаичность приведенных в обзоре данных: не представлены данные по многим крупным регионам страны. Это указывает на необходимость расширения числа пунктов мониторинга озона.

Авторы выражают благодарность Департаменту природопользования и охраны окружающей среды города Москвы и лично Е.Г. Семутниковой за создание сравнимой с зарубежными системы мониторинга, за ее развитие и поддержание на современном уровне. Также авторы выражают благодарность Госкорпорации «Росатом» за поддержку работ по созданию станции в РУДН.

Для подготовки обзора использовалась данные, полученные с помощью инфраструктуры ИОА СО РАН, включая ЦКП «Атмосфера», инфраструктуры ИФМ СО РАН, инфраструктуры КНС – ПЗ РАН филиала ФИЦ ИнБЮМ, инфраструктуры ИФА РАН, созданных и эксплуатируемых в рамках госзаданий.

1. Voosen P. Global temperatures in 2020 tied record highs // Science. 2021. V. 371, N 6527. P. 334–335.
2. Delaying COP26 is not a reason to delay climate action // Nature. 2020. V. 582, N 7810. P. 7.
3. Rosenbloom D., Markard J. A COVID-19 recovery for climate // Science. 2020. V. 371, N 6490. P. 447–448.
4. News from a postpandemic world // Science. 2020. V. 369, N 6499. P. 26–29.
5. Jain S., Sharma T. Social and travel lockdown impact considering coronavirus disease (COVID-19) on air quality in megacities of India: Present benefits, future challenges and way forward // Aerosol. Air Qual. Res. 2020. V. 20, N 6. P. 1222–1236.
6. Salma I., Vörösmarty M., Gyöngyösi A.Z., Thén W., Weidinger T. What can we learn about urban air quality with regard to the first outbreak of the COVID-19 pandemic? A case study from central Europe // Atmos. Chem. Phys. 2020. V. 20, N 24. P. 15725–15742.

7. Гинзбург А.С., Семенов В.А., Семутникова Е.Г., Алешина М.А., Захарова П.В., Лезина Е.А. Влияние ограничений, обусловленных COVID-19, на качество воздуха в Москве // Докл. РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 495, № 1. С. 74–79.
8. Wang L., Wang J., Fang Ch. Assessing the impact of lockdown on atmospheric ozone pollution amid the first half of 2020 in Shenyang, China // Int. J. Environ. Res. 2020. V. 17, N 23. P. 9004.
9. Lee J.D., Drysdale W.S., Finch D.P., Wilde S.E., Palmer P.I. UK surface NO₂ levels dropped by 42% during the COVID-19 lockdown: Impact on surface O₃ // Atmos. Chem. Phys. 2020. V. 20, N 24. P. 15743–15759.
10. Sicard P., De Marco A., Agathokleous E., Feng Z., Xu X., Paoletti E., Rodriguez J.J.D., Calatayud V. Amplified ozone pollution in cities during the COVID-19 lockdown // Sci. Total Environ. 2020. V. 735. P. 139542.
11. Моисеенко К.Б., Березина Е.В., Васильева А.В., Штабкин Ю.А., Скороход А.И., Еланский Н.Ф., Беликов И.Б. NO_x – лимитирующий режим фотохимической генерации озона в слабо загрязненном конвективном пограничном слое: наблюдения на высотной мачте ZOTTO в Центральной Сибири в 2007–2015 гг. // Докл. РАН. 2019. Т. 487, № 6. С. 669–673.
12. Xu K., Cui K., Young L.-H., Hsieh Y.-K., Wang Y.-F., Zhang J., Wan S. Impact of the COVID-19 event on air quality in Central China // Aerosol. Air Qual. Res. 2020. V. 20, N 5. P. 915–929.
13. Yao M., Zhang L., Ma J., Zhou L. On airborne transmission and control of SARS-CoV-2 // Sci. Total Environ. 2020. V. 731. P. 139178.
14. Schiermeier Q. Why pollution is falling in some cities – but not others // Nature. 2020. V. 580, N 7803. P. 313.
15. Андреев В.В., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Даудов Д.К., Еланский Н.Ф., Жамсуюева Г.С., Заляханов А.С., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Комельников 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., Фофонов А.В., Челибанов И.В., Челибанинов В.П., Широтов В.В. Приземная концентрация озона на территории России в первом полугодии 2020 г. // Оптика атмосф. и океана. 2020. Т. 33, № 9. С. 710–721; Andreev V.V., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Elansky N.F., Zhamsueva G.S., Zayakhhanov 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., Chelibanova I.V., Chelibanov V.P., Shirotov 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.
16. Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н. Изменчивость приземного озона в окрестностях Москвы: результаты десятилетних регулярных наблюдений // Изв. АН. Физика атмосф. и океана. 2002. Т. 38, № 4. С. 486–495.
17. Viglione G. COVID-19 could ruin weather forecasts and climate records // Nature. 2020. V. 580, N 7804. P. 440–441.
18. URL: <https://mosecom.mos.ru> (last access: 25.01.2021).
19. URL: <https://mosecom.mos.ru/vozdux/> (last access: 25.01.2021).
20. Лапченко В.А., Звягинцев А.М. Малые газовые составляющие атмосферы в Карадагском природном заповеднике в Крыму // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 2. С. 178–181.
21. Niinemets U. What are plant-released biogenic volatiles and how they participate in landscape- to global-level processes? // Ecosystem services from forest landscapes. Springer, 2018. P. 29–56.
22. Miyama T., Morishita T., Kominami Y., Noguchi H., Yasuda Y., Yoshifumi N., Okano M., Yamanoi K., Mizoguchi Y., Takanashi S., Kitamura K., Matsumoto K. Increases in biogenic volatile organic compound concentrations observed after rains at six forest sites in non-summer periods // Atmosphere. 2020. V. 11. DOI: 10.3390/atmos11121381.
23. Сеник И.А., Еланский Н.Ф., Беликов И.Б., Лисицына Л.В., Галактионов В.В., Кортунова З.В. Основные закономерности временной изменчивости приземного озона на высотах 870 и 2070 м в районе г. Кисловодска // Изв. РАН. Физ. атмосф. океана. 2005. Т. 41, № 1. С. 78–91.
24. Draxler R.R., Hess G.D. An overview of the HYSPLIT_4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition // Aust. Meteor. Mag. 1998. V. 47. P. 295–308.
25. Draxler R.R., Rolph G.D. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) model access via NOAA ARL READY Website. URL: <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>. 2014.
26. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woolen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Am. Meteorol. Soc. 1996. V. 77. P. 437–471.
27. Kistler R., Kalnay E., Collins W., Saha S., White G., Woolen J., Chelliah M., Ebisuzaki W., Kanamitsu M., Kousky V., Dool H., Jenne R., Fiorino M. The NCEP/NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2001. V. 82. P. 247–268.
28. Shukurov K.A., Chkhetiani O.G. Probability of transport of air parcels from the arid lands in the Southern Russia to Moscow region // Proc. SPIE. 2017. V. 10466. DOI: 10.1117/12.2287932.
29. Гигиенический норматив ГН 2.1.6.3492-17 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений». Постановление Главного Государственного санитарного врача Российской Федерации № 165 от 22 декабря 2017 года (с изменениями на 31 мая 2018 г.).
30. Гигиенический норматив ГН 2.2.5.3532-18 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны». Постановление Главного Государственного санитарного врача Российской Федерации № 25 от 13 февраля 2018 г.
31. Ma X., Huang J., Zhao T., Liu Ch., Zhao K., Xing J., Xiao W. Rapid increase in summer surface ozone over the North China Plain during 2013–2019: A side effect of particulate matter reduction control? // Atmos. Chem. Phys. 2021. V. 21, N 1. P. 1–16.
32. Rasmussen D.J., Hu J., Mahmud A., Kleeman M.J. The ozone – climate penalty: Past, present, and future // Environ. Sci. Technol. 2013. V. 47, N 11. P. 14258–14266.
33. Zhang Y., West J.J., Emmons L.K., Flemming J., Jonson J.E., Lund M.T., Sekiya T., Sudo K., Gaudel A., Chang K.-L., Nédélec Ph., Thouret V. Contributions of world regions to the global tropospheric ozone burden change from 1980 to 2010 // Geophys. Res. Lett. 2021. V. 48, N 1. DOI: 10.1029/2020GL089184.

34. Hossain M.S., Christopher Frey Ch., Louie P.K.K., Lau A.K.H. Combined effects of increased O₃ and reduced NO₂ concentrations on short-term air pollution health risks in Hong Kong // Environ. Pollut. 2021. V. 270. P. 116280.
35. Hertig E., Russo A., Trigo R.M. Heat and ozone pollution waves in central and South Europe – characteristics, weather types, and association with mortality // Atmosphere. 2020. V. 11, N 123. DOI: 10.3390/atmos11121271.

V.V. Andreev, M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, S.B. Belan, D.K. Davydov, V.I. Demin, N.F. Elansky, G.S. Zhamisheva, A.S. Zayakhanov, G.A. Ivlev, A.V. Kozlov, S.N. Kotel'nikov, I.N. Kuznetsova, V.A. Lapchenko, E.A. Lezina, O.V. Postolyakov, D.E. Savkin, I.A. Senik, E.V. Stepanov, G.N. Tolmachev, A.V. Fofonov, I.V. Chelibanov, V.P. Chelibanov, V.V. Shirotov, K.A. Shukurov. **Surface ozone concentration over Russian territory in the second half of 2020.**

The review provides information on ozone concentration in the surface air layer in the second half of 2020. Data were obtained at 13 stations located in different regions of Russia. An assessment was made of the excess of hygienic standards established in the Russian Federation, both in the second half of the year and in the whole 2020. It is shown that the daily average maximum permissible concentration of ozone is regularly exceeded at all stations. There are cases of exceeding the one-time maximal maximum permissible concentration.