

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.510.42

Концентрация тропосферного озона на территории России в 2022 г.

В.В. Андреев¹, М.Ю. Аршинов², Б.Д. Белан^{✉ 2}, С.Б. Белан²,
Д.К. Давыдов², В.И. Демин³, Н.В. Дудорова², Н.Ф. Еланский⁴,
Г.С. Жамсуева⁵, А.С. Заяханов⁵, Р.В. Иванов⁶, Г.А. Ивлев², А.В. Козлов²,
Л.В. Коновальцева¹, М.Ю. Коренский⁶, С.Н. Котельников⁶, И.Н. Кузнецова⁷,
В.А. Лапченко⁸, Е.А. Лезина⁹, В.А. Оболкин¹⁰, О.В. Постыляков⁴,
В.Л. Потемкин¹⁰, Д.Е. Савкин², Е.Г. Семутникова⁹, И.А. Сеник⁴,
Е.В. Степанов⁶, Г.Н. Толмачев², А.В. Фофонов², Т.В. Ходжер¹⁰,
И.В. Челибанов¹¹, В.П. Челибанов¹¹, В.В. Широтов¹², К.А. Шукуров^{4*}

¹Российский университет дружбы народов

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

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

³Полярный геофизический институт РАН

184209, Мурманская обл., г. Апатиты, Академгородок, 26а

⁴Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3, стр. 1

⁵Институт физического материаловедения СО РАН

670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

⁶Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

111933, г. Москва, ул. Вавилова, 38

⁷Гидрометцентр России

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

⁸Карадагская 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

⁹Мосэкомониторинг

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

¹⁰Лимнологический институт СО РАН

664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3

¹¹Приборостроительное предприятие «ОПТЭК»

199178, г. Санкт-Петербург, Малый проспект В.О., 58

¹²НПО «Тайфун»

249038, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Победы, 4

Поступила в редакцию 3.05.2023 г.;

после доработки 1.06.2023 г.;

принята к печати 8.06.2023 г.

Рассматривается распределение тропосферного озона на территории России в 2022 г. по данным 33 станций, расположенных в разных физико-географических зонах, а также его вертикальное распределение по результатам самолетного зондирования. Показано, что во всех пунктах измерений превышались предельно допустимые среднесуточные концентрации, установленные отечественным гигиеническим нормативом. В отдельных регионах фиксируется превышение предельно допустимых концентраций рабочей зоны и максимальных разовых среднечасовых концентраций. В сложившейся ситуации необходимо широко информировать население о результатах мониторинга и проводить мероприятия по снижению уровня концентрации озона в приземном слое воздуха.

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

*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); Нина Викторовна Дудорова (ninosh@mail.ru); Николай Филиппович Еланский (n.f.elansky@mail.ru); Галина Санжиевна

Введение

Во всех развитых странах озон в силу его физико-химических свойств [1–5] и воздействия, которое он оказывает на биологические субъекты и объекты окружающей среды, рассматривается как загрязнитель воздуха номер один. В первую очередь это обусловлено преждевременной смертностью населения, вызванной загрязнением воздуха, включая озон, которая, по данным [6], может достигать на планете 3,3 млн человек в год.

Помимо воздействия на здоровье населения, озон в больших концентрациях сильно угнетает жизнедеятельность растений. Их реакция на повышенную концентрацию озона заключается в снижении урожайности, а иногда и гибели растений [7, 8]. Озон уменьшает способность растений поглощать углекислый газ, что может привести к усилению радиационного форсинга планеты [9, 10]. Он также является мощнейшим окислителем, разрушающим резину, каучук, окисляющим многие металлы, даже платиновой группы [11–15]. Его вклад в радиационный эффект превышает 8% общего нагревания воздуха, обусловленного поглощением солнечного излучения парниковыми газами [16]. В условиях теплеющего климата рост концентрации озона наиболее вероятен [17–19]. Поскольку при генерации тропосферного озона в воздухе образуется гидроксил, то этот процесс будет сопровождаться повышением окислительного потенциала атмосферы [20].

Такое многообразие возможных отрицательных последствий увеличения концентрации тропосферного озона как для человека, так и для окружающей среды требует повышенного внимания к тенденциям изменения его содержания в приземном воздухе. По данным [18], в Европе уже в 2003 г. насчитывалось более 10 тыс. станций мониторинга озона и его предшественников. При этом очень важно, что информация доводится до населения и используется для принятия решений органами управления. В США и Европе уже удалось добиться снижения концентрации озона в воздухе [21–23]. Имеется большой прогресс в этом направлении и в Китае [24–26]. Но даже при таком внимании к проблеме в развитых странах авторы [27] считают, что пока делается недостаточно для ее решения, поскольку происходит перенос газов-предшественников из соседних стран и регионов, повышающих его фон. Они предлагают создать орган по типу Международной группы экспертов по изменению кли-

мата для обоснования принятия политических решений по проблеме тропосферного озона.

В бывшем СССР и в нынешней России мониторингу озона и мероприятиям по уменьшению его содержания не уделяется должного внимания. Росгидромет, на который возложена обязанность контролировать качество атмосферного воздуха, проводит технологическую модернизацию наблюдательной сети, поэтому измерения приземного озона осуществляет лишь в небольшом числе крупных и промышленных городов. В двух самых больших мегаполисах России – Санкт-Петербурге и Москве – имеются сравнимые с зарубежными аналогами системы мониторинга приземного озона и других загрязняющих веществ. В г. Москве с 2002 г. функционирует сеть экологического мониторинга Государственного природоохранного бюджетного учреждения «Мосэкомониторинг» – специально уполномоченной организации г. Москвы по осуществлению государственного экологического мониторинга [28]. Концентрации приземного озона измеряются на 15 автоматических станциях контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) ежечасно и круглосуточно. В ежегодном докладе публикуются аналитические материалы о состоянии окружающей среды в Москве [29]. Они также частично включаются в обзоры [30, 31].

Однако в государственных докладах данные о содержании приземного озона на территории России до сих пор не приводятся [32, 33]. На остальной территории РФ наблюдения за озоном организованы в инициативном порядке в основном научными организациями или вузами. Сложившийся неформальный консорциум таких организаций начал публиковать ежегодные обзоры, в которых представлена информация о содержании озона в тропосфере над территорией России [34–36]. Настоящая статья является продолжением вышеупомянутой серии обзоров. Ее целями является сбор в одной публикации данных о содержании озона в приземном слое воздуха в 2022 г. в различных регионах России, сравнительный анализ этих данных и их соотнесение с отечественными гигиеническими нормативам [37].

1. Сеть станций и их расположение

Перечень большинства станций и оборудования, установленного на них, описание режима их работы приводилось ранее в обзорах [34–36]. Количество станций с каждым годом увеличивается.

Жамсуева (galinazham@gmail.com); Александр Савельевич Заяханов (lmza@mail.ru); Роман Владимирович Иванов (leon076@yandex.ru); Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru); Артем Владимирович Козлов (artem@iao.ru); Людмила Владимировна Коновальцева (konovaltseva_lv@pfur.ru); Михаил Юрьевич Коренский (miklekor@mail.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); Владимир Аркадьевич Оболкин (obolkin@lin.irk.ru); Олег

Вадимович Постыляков (oleg.postylyakov@gmail.com); Владимир Львович Потемкин (klimat@lin.irk.ru); Денис Евгеньевич Савкин (sde@iao.ru); Евгения Геннадьевна Семутникова (lezinaea@eco.mos.ru); Ирина Анатольевна Сенник (senik_ia@list.ru); Евгений Валерьевич Степанов (EugeneStepanov@yandex.ru); Геннадий Николаевич Толмачев (tgn@ipc.tsc.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru); Тамара Викторовна Ходжер (khodzher@lin.irk.ru); Иван Владимирович Челибанов (ichelibanov@gmail.com); Владимир Петрович Челибанов (chelibanov@gmail.com); Вадим Викторович Широков (shirotov@rpatyphoon.ru); Карим Абдурахимович Шукуров (karim.shukurov@ifaran.ru).

Т а б л и ц а 1

Станции, осуществляющие мониторинг озона в приземном слое воздуха в России

№	Станция	Регион	Координаты		Высота н.у.м, м	Тип
			широта	долгота		
1	ОПТЭК-PR	Ленинградская область	60°42'59"	30°03'24"	40	фоновая
2	ОПТЭК-Р	Санкт-Петербург	59°56'27"	30°15'14"	8	городская
3	ОПТЭК-N	Санкт-Петербург	59°55'23"	30°23'17"	1	городская
4	ОПТЭК-Карелия	Республика Карелия	63°44'41"	31°56'33"	185	фоновая
5	Апатиты	Мурманская область	67°34'14"	33°23'51"	180	городская
6	СФЭМ «Карадаг»	Республика Крым	44°56'24"	35°14'12"	180	фоновая
7	Обнинск	Калужская область	55°05'48"	36°36'36"	175	городская
8	Таруса	Калужская область	54°43'36"	37°10'40"	128	городская
9	Троицк	Москва	55°28'37"	37°18'44"	193	пригородная
10	РУДН	Москва	55°42'37"	37°36'78"	149	городская
11	КВНС ИФА РАН	Ставропольский край	43°43'59"	42°39'40"	2096	высокогорная
12	Вятские Поляны	Кировская область	56°13'33"	51°03'56"	74	фоновая
13	Фоновая	Томская область	56°25'07"	84°04'27"	80	фоновая
14	ТОР	Томская область	56°28'41"	85°03'15"	133	городская
15	БЭК	Томская область	56°28'49"	85°06'08"	120	пригородная
16	Листвянка	Иркутская область	51°50'48"	104°53'58"	670	фоновая
17	Боярский	Республика Бурятия	51°50'22"	106°03'50"	516	фоновая
18	Улан-Удэ	Республика Бурятия	51°48'48"	107°37'20"	523	городская

В табл. 1 приведен перечень станций, данные которых включены в настоящий обзор. Средние характеристики озона определялись по данным АСКЗА Мосэкомониторинга (табл. 2).

Табл. 1 показывает, что станции, измеряющие приземную концентрацию озона (ПКО), расположены на территории всего лишь 13 субъектов Федерации. Это меньше шестой части от общего количества субъектов Российской Федерации. Для такой огромной страны, как Россия, этого недостаточно. По типу окружающей среды станции можно разделить на городские (9) и фоновые (7); две станции относятся к пригородным и одна к высокогорным. Самой западной из станций, осуществляющих измерения в приземном слое, является ОПТЭК-PR, восточной — Улан-Удэ, северной — Апатиты, южной — Карадаг.

Расположение станций на территории России показано на рис. 1, *а* (цв. вкладка). В связи с «кустовым» характером их размещения для четырех регионов — Санкт-Петербург, Москва, Томск и Прибайкалье — сделаны более подробные врезки. На рис. 1, *б* отдельно показано расположение станций Мосэкомониторинга.

Из рис. 1, *а* видно, что пока мониторинговыми измерениями озона охвачена приблизительно третья часть территории РФ. Отсутствуют измерения в таких огромных регионах, как Красноярский край, Якутия, Чукотка, Камчатка, Дальний Восток, северные районы ЕТР и Западной Сибири. Плотность же расположения функционирующих станций крайне низкая. Этот вывод не относится только к г. Москве (рис. 1, *б*), где количество станций сопоставимо с общероссийским.

Т а б л и ц а 2

Станции ГПБУ «Мосэкомониторинг»

№	Станция	Координаты		Тип
		широта	долгота	
19	Марьино	37°45'72"	55°39'11"	городская
20	МГУ	37°31'26"	55°42'25"	городская
21	Лосиный остров	37°43'41"	55°51'32"	городская
22	Толбухина	37°24'18"	55°43'19"	городская
23	Полярная	37°38'20"	55°52'30"	городская
24	Туристская	37°25'41"	55°51'25"	городская
25	Спиридоновка	37°35'49"	55°45'32"	городская
26	Останкино	37°36'58"	55°49'16"	городская
27	Кожухово	37°54'43"	55°43'23"	городская
28	Кожуховский пр.	37°39'54"	55°42'29"	городская
29	МАДИ	37°31'44"	55°48'07"	примагистральная
30	Пл. Гагарина	37°35'06"	55°42'36"	примагистральная
31	Хамовники	37°34'19"	55°43'08"	примагистральная
32	Н. Масловка	37°34'48"	55°47'31"	примагистральная
33	Шаболовка	37°36'22"	55°42'54"	примагистральная

2. Результаты мониторинга приземной концентрации озона

2.1. Среднегодовые данные

На рис. 2 приведены среднегодовые концентрации озона, измеренные на станциях, которые перечислены в табл. 1, в 2022 г. Ввиду того, что наблюдения в пунктах Улан-Удэ и Боярск велись поочередно, их данные объединены в один ряд под названием «Бурятия». Вертикальными отрезками показаны среднеквадратические отклонения.

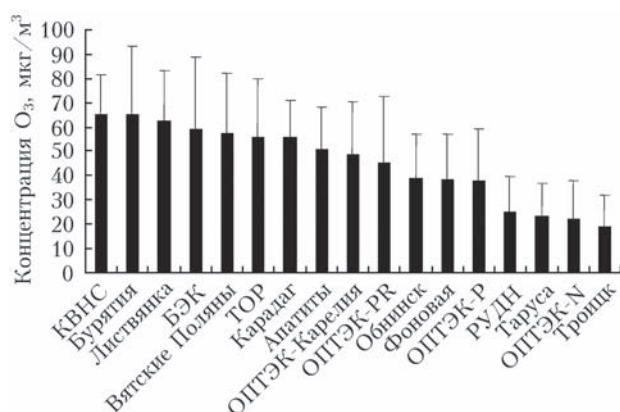


Рис. 2. Среднегодовые концентрации озона в 2022 г.

Из рис. 2 видно, что среднегодовые концентрации ПКО в 2022 г. различались на территории России более чем в три раза. Наибольшие значения фиксировались на ст. КВНС, Бурятия, Листвянка и БЭК. Наименьшие — в Москве (РУДН), Тарусе, Санкт-Петербурге (ОПТЭК-Н) и Троицке. Первые, за исключением КВНС, можно отнести к фоновым или пригородным, вторые — к городским. По-видимому, в городских условиях на величине среднегодовой ПКО сказывается нейтрализация озона в выхлопах автотранспорта, наиболее ярко проявляющаяся в ночные часы.

На девяти станциях мониторинг озона осуществлялся в течение трех лет. Рис. 3 демонстрирует, как менялась среднегодовая концентрация озона в 2020–2022 гг.

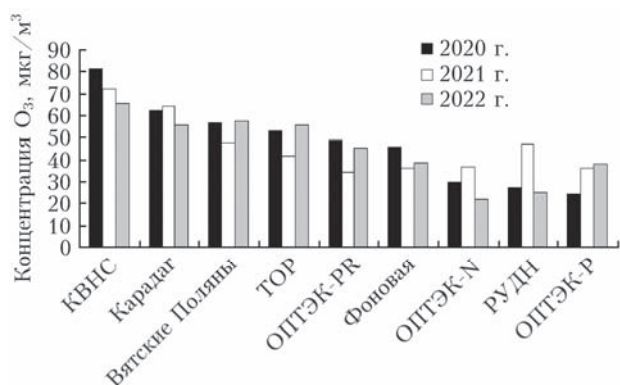


Рис. 3. Среднегодовые концентрации озона в 2020–2022 гг.

Данные рис. 3 свидетельствуют, что ПКО в отдельных пунктах изменяется от года к году на 20–30%, достигая разницы в два раза в Москве (РУДН). На КВНС концентрация озона в период с 2020 по 2022 г. снижалась. На фоновых станциях Вятские Поляны, ТОР, ОПТЭК-РР и обсерватория «Фоновая» в 2021 г. наблюдалось уменьшение, а на городских станциях ОПТЭК-Н, РУДН и ОПТЭК-Р — увеличение ПКО. Пока сложно комментировать такое поведение озона.

По-иному распределяются на территории России годовые максимумы (рис. 4). Вертикальными отрезками показана неопределенность (погрешность) разового измерения.

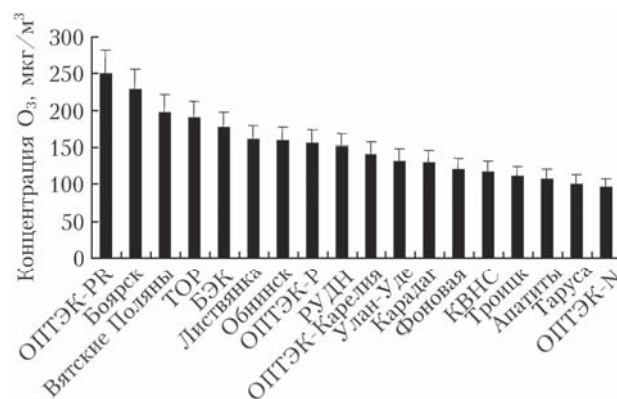


Рис. 4. Годовые максимумы концентрации озона в 2022 г.

Из рис. 4 видно, что наибольшие концентрации озона, превышающие предельно допустимую максимальную разовую (ПДК_{мр}) [37], наблюдались в 2022 г. в основном на фоновых станциях ОПТЭК-РР, Боярск, Вятские Поляны, ТОР, БЭК и Листвянка. Они расположены, как правило, в лесных районах, где наблюдается обычно повышенное содержание органических соединений растительного происхождения [38].

Межгодовые различия абсолютных максимумов приведены на рис. 5.

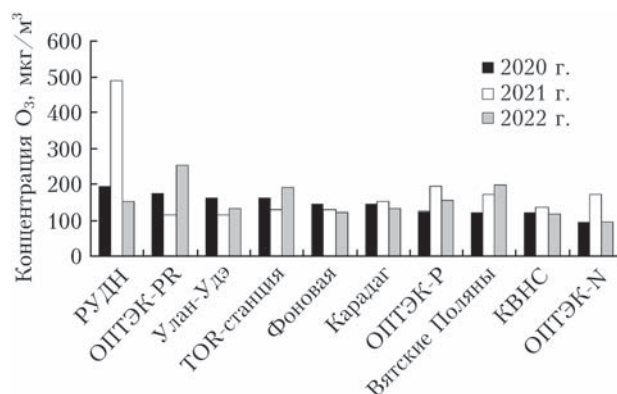


Рис. 5. Годовые максимумы концентрации озона в 2020–2022 гг.

На рис. 5 отчетливо выделяется максимум концентрации в 2021 г. в Москве (РУДН). Он отражает смог, который наблюдался в городе летом. Этому

способствовал уникальный по длительности блокирующий антициклон в период максимальных летних температур [36]. В 2022 г. наибольшие концентрации озона фиксировались на ст. ОПТЭК-PR.

Приведенные на рис. 2–5 данные отражают физико-географические особенности районов, где проводились измерения. Можно выделить местности с высокими среднесуточными или максимально разовыми концентрациями озона. Очевидно, что для такой большой страны, как Россия, они могут сильно различаться. Это характерно и для других крупных государств [39–41].

2.2. Годовой ход

На рис. 6 представлен годовой ход концентрации озона, в приземном слое воздуха на различных станциях. Станции расположены в порядке убывания годовой концентрации озона в соответствии с данными рис. 1. Здесь же горизонтальными линиями показаны уровни предельных среднесуточных концентраций (ПДК_{сс}) для оценки периодов превышения гигиенических нормативов. Количественные характеристики таких превышений приведены ниже.

Особенный годовой ход наблюдается на высокогорной станции КВНС, которая большую часть времени находится в воздухе свободной атмосферы. Горный рельеф способствует переносу обогащенного озона воздуха из стратосферы в свободную атмосферу и связанному с этим повышению наблюдаемой на станции концентрации примеси. С начала измерений приземного озона в 1989 г. на КВНС наблюдались, как правило, два локальных максимума среднемесячных концентраций озона — весной и летом, а минимум приходился на осень-зиму [42]. Особенностью 2022 г. стал невыраженный локальный весенний максимум. В период летнего максимума 2022 г. абсолютные среднечасовые содержания 27–31 августа достигали 117 мкг/м³, а 31 июля — 1 августа — 110 мкг/м³. Такие значения меньше максимумов, зарегистрированных в 2020 и 2021 гг., превышавших 140 мкг/м³ [34–36]. В условиях высокогорья на КВНС высокие концентрации озона могут быть связаны со стратосферными вторжениями в свободную тропосферу и последующим перемешиванием в зоне орографических возмущений [43]. Как правило, подобные события имеют небольшую продолжительность — от одного до нескольких часов. Кроме этого, повышенные концентрации могут быть связаны с генерацией озона в загрязненном воздухе при дальнем переносе.

Для оценки вклада дальнего переноса в наблюдаемые экстремальные значения был выполнен траекторный анализ приходящих на КВНС воздушных масс. Методика расчета 7-суточных обратных траекторий описана в обзоре наблюдений 2020 г. [34–36]. При расчетах в 2022 г. было смоделировано 22479 траекторий. Для уменьшения влияния локальных факторов мы исключили из анализа обратные траектории для дней, характеризующихся

высокой влажностью (более 85%) и наличием тумана в конечной точке траектории (на КВНС), которые точно не связаны с дальним переносом. После этого в массиве осталось 20619 траекторий. Из этого массива были отобраны два набора траекторий, соответствующих экстремальным отрицательным и экстремальным положительным аномалиям озона, соответственно, первого и последнего децилей функции распределения аномалий озона, рассчитанных относительно аппроксимирующего полинома второй степени. Для экстремальных значений концентрации озона обоих знаков были оценены поля вероятности (P , %) переноса воздушных частиц из пространственных ячеек размером $1^\circ \times 1^\circ$ к КВНС. На рис. 7 (цв. вкладка) показаны поля среднегодовой вероятности переноса воздушных частиц для экстремально низких и экстремально высоких значений озона на КВНС.

Поля вероятности в 2022 г. в целом сходны с оценками 2020 и 2021 гг.: экстремально низкие значения содержания приземного озона на КВНС в 2022 г. были связаны с переносом воздуха с северо-западных направлений, экстремально высокие — с южных направлений. Траектории, связанные с экстремально низкими приземными концентрациями в 2022 г., как и в 2020 и 2021 гг., с наибольшей вероятностью пролегали над Краснодарским краем, Азовским морем и украинским Приазовьем. Причиной экстремально высоких значений в 2022 г., как и в 2021 г., стали источники юго-восточного кластера — воздушные массы с наибольшей вероятностью перемещались над Азербайджаном и Южным Каспием. Второй кластер высоких значений, как и в 2020 и 2021 гг., связан с приходом воздушных масс из Турции и с Ближнего Востока. Оба кластера — это районы с интенсивной добычей и переработкой нефти и газа, окисление летучих органических соединений в шлейфе которых в условиях высоких температур и солнечной освещенности приводит к генерации озона. Протекание воздушных масс над этими районами, наряду с перемешиванием в зоне орографических возмущений, может являться причиной зарегистрированных повышенных значений [44].

На ст. Боярск измерения проводились в основном в теплый период. Здесь, так же как и на КВНС, среднесуточные ПКО находятся в диапазоне 1–3 ПДК_{сс}, в отдельные дни достигая 5 ПДК_{сс}. Из-за неполного годового цикла судить о годовом ходе затруднительно.

На ст. Листвянка, БЭК, Вятские Поляны и ТОР годовой ход типичен для фоновых районов, с максимумом в весенний период и минимумом в осенний. Во всех пунктах содержание озона находится в пределах 2–4 ПДК_{сс} в первую половину года и в диапазоне 1–2 ПДК_{сс} — во вторую.

На ст. Карадаг годовой ход ПКО в 2022 г. заметно отличается от предыдущих лет [34–36], когда максимум концентрации в этом регионе наблюдался осенью. В 2022 г. осенью (сентябрь, октябрь)

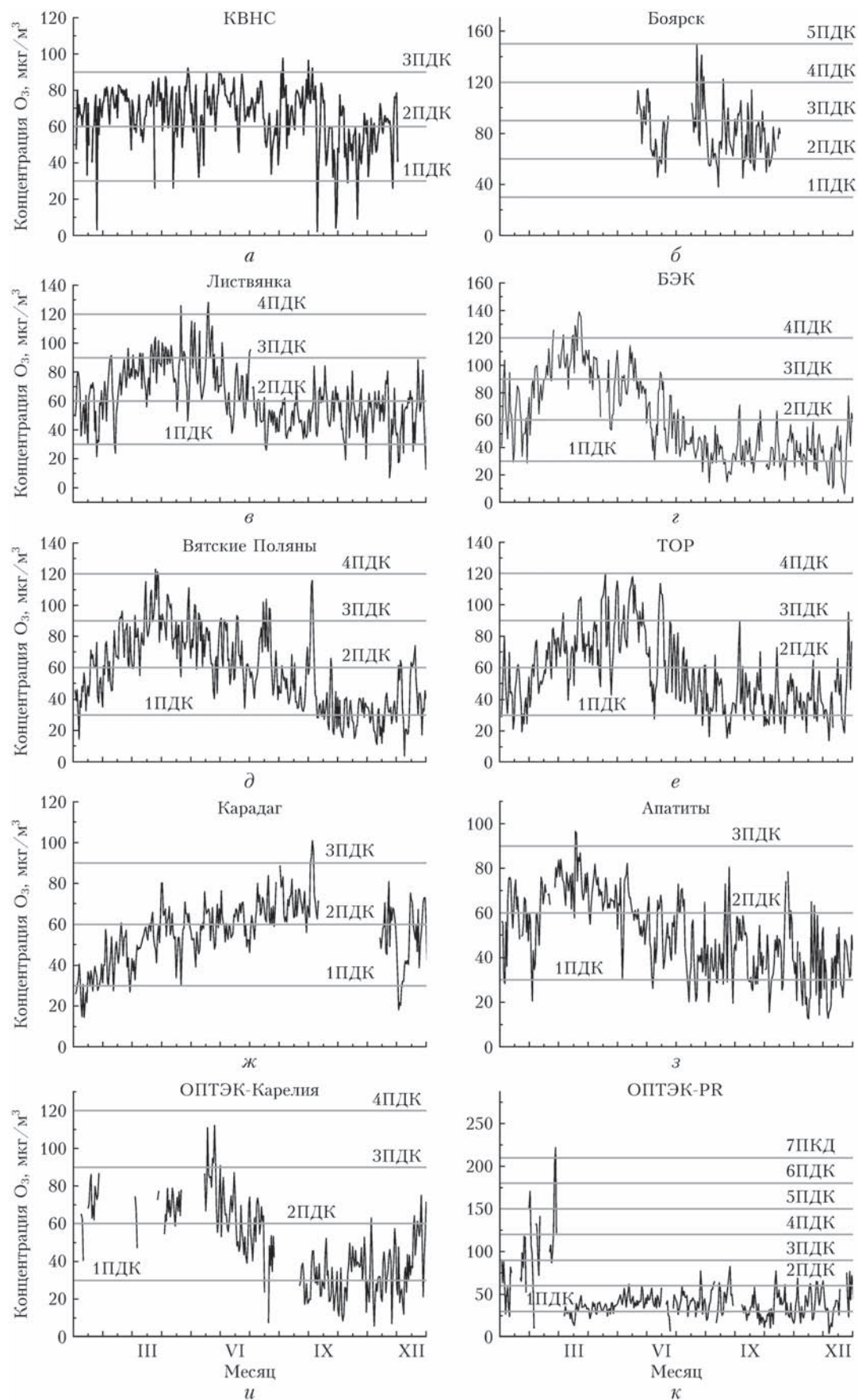
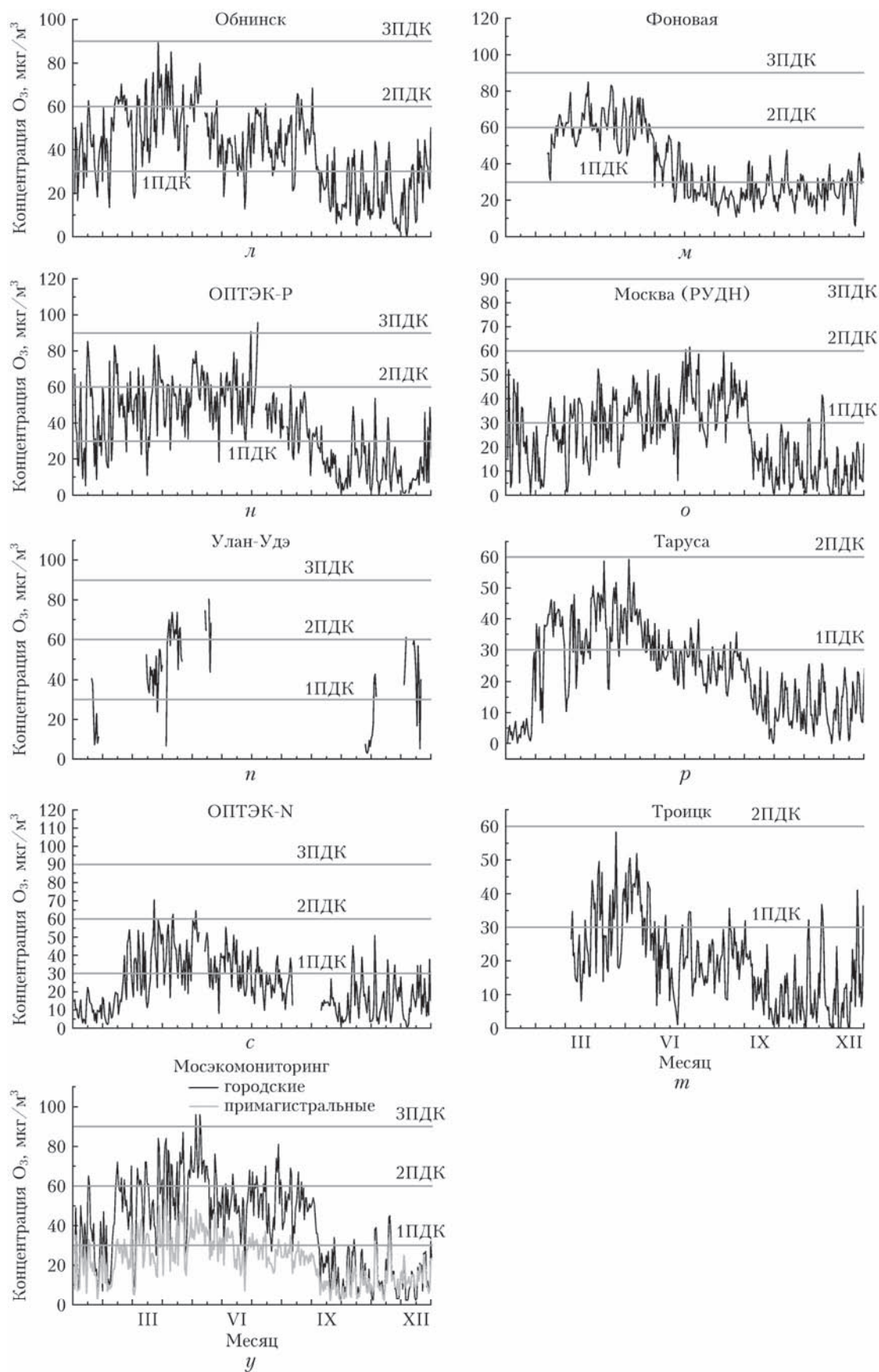


Рис. 6. Годовой ход среднесуточной концентрации озона в 2022 г. (окончание см. на с. 648)



Окончание рис. 6 (начало см. на с. 647)

измерения не проводились, что было связано с ремонтом и ежегодной плановой поверкой газоанализатора во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева в г. Санкт-Петербурге. Наиболее вероятной причиной такой аномалии (осенний максимум) являются холодная весна и прохладное начало лета.

Годовой ход в Апатитах и Карелии, по-видимому, можно считать типичным для северных районов ЕТР. Здесь максимум наблюдается весной, минимум — осенью при относительно невысоких концентрациях озона 1–3 ПДК_{сс}.

Достаточно своеобразным является годовой ход на станции ОПТЭК-РР. В начале года зафиксирован резкий рост концентраций до 7 ПДК_{сс}, а затем, с мая и до конца года, ход почти нейтральный в диапазоне 1–2 ПДК_{сс}.

Обнинск хотя и относится к городским станциям, но здесь годовой ход был типичен для фоновых районов: максимум весной и минимум осенью. Содержание озона в течение всего года находилось в пределах 1–3 ПДК_{сс} и снизилось до 1 ПДК_{сс} и меньше к концу года.

На обсерватории «Фоновая» годовой ход типичен для районов, удаленных от промышленных центров, с максимумом концентрации весной и минимумом осенью и зимой. В отличие от других фоновых станций концентрация озона была относительно невысокой: в максимуме — 2–3 ПДК_{сс}, в минимуме — меньше или равно ПДК_{сс}.

Остальные шесть станций относятся к городским, и здесь наблюдались минимальные среднегодовые концентрации озона (см. рис. 2). На ст. ОПТЭК-Р, РУДН и Улан-Удэ годовой ход типичен для городских условий с максимумом в летнее время. Значение ПКО лежит в пределах 1–3 ПДК_{сс}. Три оставшиеся станции относятся к районам, в которых наименьшие концентрации озона минимальные, меньше или чуть выше ПДК_{сс}. По-видимому, в этих городах нет значительных антропогенных выбросов озonoобразующих соединений. Об этом можно судить не только по низким ПКО, но и по характеру годового хода, который соответствует фоновым условиям.

В заключение этого раздела рассмотрим средние характеристики по г. Москве, представленные на рис. 6, *у*. Здесь приведены среднесуточные концентрации озона, осредненные по девяти городским и шести примагистральным станциям. Средняя годовая концентрация озона в приземном воздухе в жилых районах Москвы составила 39 мкг/м³ (32–45 мкг/м³ на городских АСКЗА) и 22 мкг/м³ вблизи автомагистралей (19–26 мкг/м³ на АСКЗА транспортного типа), что отражает характерную для мегаполиса неоднородность поля приземного озона. Данные измерений ПКО на однотипных станциях при различной удаленности от источников загрязнения и ландшафтных особенностях хорошо коррелируют между собой; коэффициент корреляции между АСКЗА городского типа составил 0,9–0,96 (между АСКЗА Толбухина и МГУ $R = 0,82$). В годовом ходе максимум концентрации озона наблюдался весной, годовой минимум — октябре — декабре.

Средние за летние месяцы концентрации озона оказались сравнимы со средней величиной ПКО в марте и были примерно на 10 мкг/м³ меньше, чем в апреле-мае.

Из рис. 6, *у* видно, насколько эффективно озон гасится в выхлопах автотранспорта. Его содержание на примагистральных станциях в целом за год почти в два раза ниже, чем на городских. Но даже на таких АСКЗА ПКО превышают среднесуточные ПДК_{сс}.

2.3. Максимальные концентрации

На рис. 8 показан годовой (2022 г.) ход максимальных за час ПКО на различных станциях. Согласно рис. 4 максимальные часовые ПКО фиксировались не в тех районах, где наблюдались наибольшие среднегодовые концентрации озона. Поэтому станции на рис. 8 расположены в порядке убывания значений, представленных на рис. 4. Данные для Боярска и Улан-Удэ объединены в одной графике. Здесь же горизонтальными линиями показаны максимальные разовые за час ПДК (ПДК_{мр}) и ПДК рабочей зоны (ПДК_{рз}).

Из рис. 8 видно превышение часовых ПДК_{мр} на шести станциях (фоновых или пригородных). На девяти станциях есть превышение уровня 100 мкг/м³, что является основанием для определения ПДК_{рз}. Напомним, что, согласно [37], такая концентрация должна фиксироваться не менее восьми часов подряд. На двух станциях (Таруса и ОПТЭК-Н) максимальная концентрация озона в приземном слое воздуха не достигала 100 мкг/м³. В разд. 4 приведены количественные значения превышений ПДК.

На фоновых станциях (ОПТЭК-РР, Вятские Поляны, ТОР, БЭК и Листвянка) в годовом ходе максимальные концентрации наблюдаются весной, во время основного их роста. В Вятских Полянах, БЭКе и на ТОР имеются вторичные максимумы в летнее время. Возможно, это обусловлено антропогенной деятельностью в окрестностях станций. И только на одной станции, в Боярске, основной максимум фиксируется в летнее время.

На городских станциях (Обнинск, РУДН, ОПТЭК-Р, Троицк, Таруса и ОПТЭК-Н) максимальные концентрации наблюдаются летом, что, вероятно, отражает образования озона из антропогенных выбросов при повышенных температурах воздуха [44–47].

На двух фоновых станциях (ОПТЭК-Карелия и Фоновая) максимальные концентрации озона в приземном слое воздуха наблюдались в конце весны. Возможно, это связано с метеорологическими условиями в этих районах.

В Карадаге заметно различаются годовые ходы среднесуточных и максимальных концентраций. Максимальные концентрации озона в приземном слое воздуха наблюдались в летние месяцы (июль, август). Самые высокие значения в 2022 г. зафиксированы 8 июля и 22 августа в ясные безветренные дни (130 и 128 мкг/м³ соответственно).

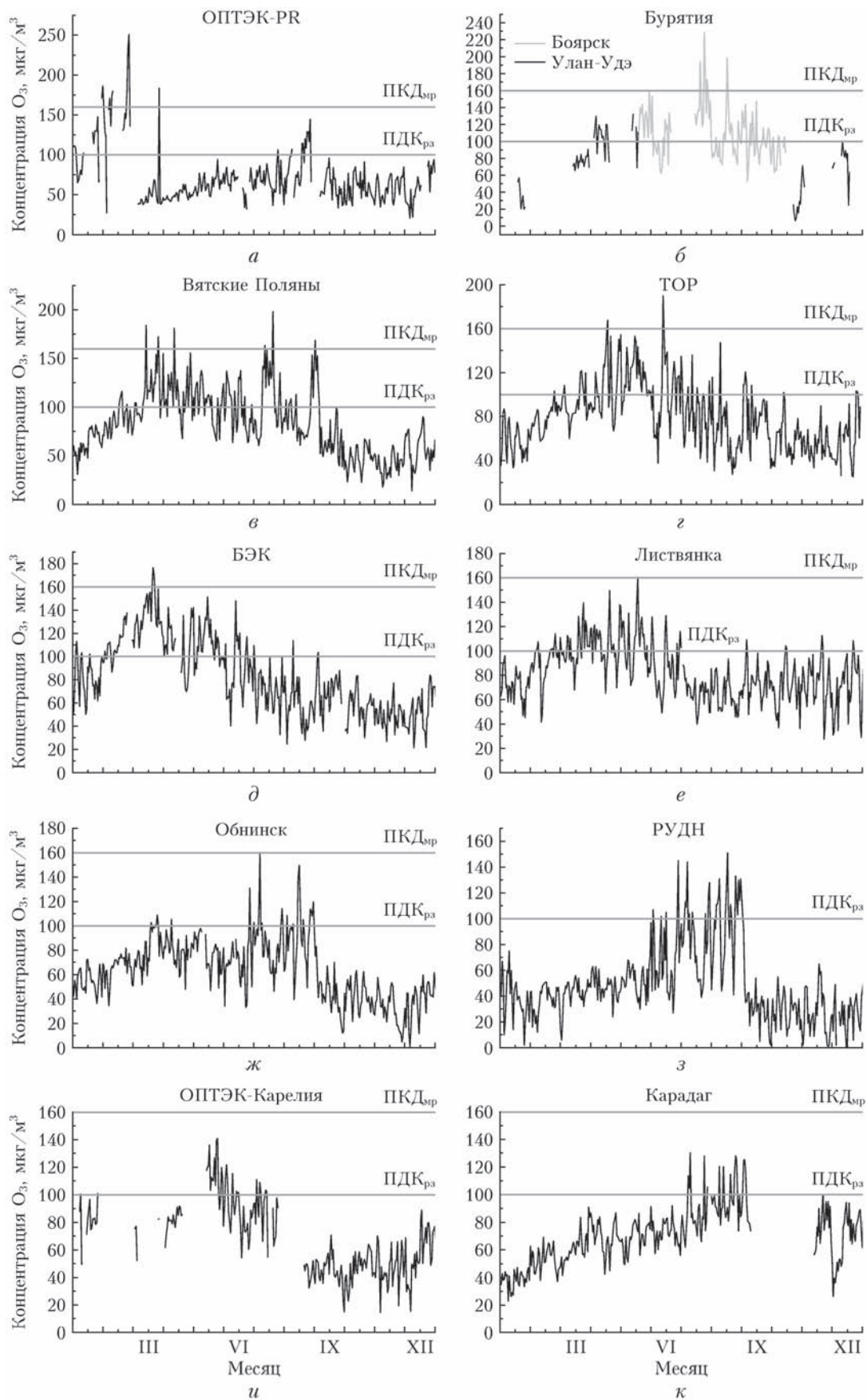
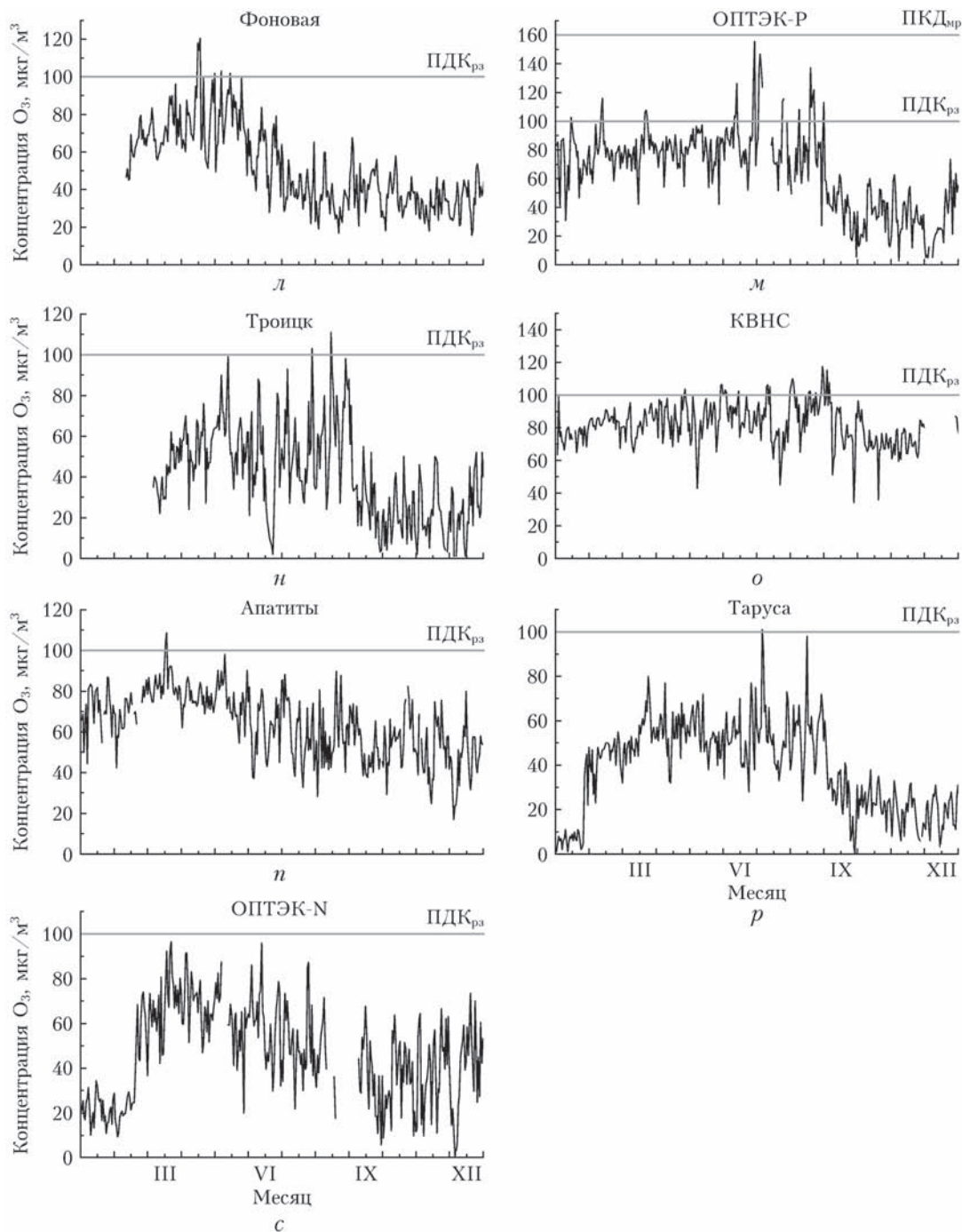


Рис. 8. Годовой ход максимальной за час концентрации озона в 2022 г. (окончание см. на с. 651)



Окончание рис. 8 (начало см. на с. 650)

Максимальная концентрация озона летом наблюдалась при южном и юго-восточном направлениях воздушных масс.

На КВНС фиксировался всплеск максимальных концентраций озона в конце лета при достаточно нейтральном годовом ходе в остальные периоды.

Маловыраженная динамика максимальных концентраций в годовом ходе также зафиксирован в Апатитах.

Если сравнивать значения среднесуточных и максимальных концентраций озона в приземном слое воздуха в России, приведенных выше, с дан-

ными в других странах, то они соизмеримы с ПКО в США и Европе [48–50] и несколько ниже, чем в Китае [51].

3. Вертикальное распределение озона в тропосфере

Вертикальное распределение озона в тропосфере измерялось с самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик» [52], современный состав оборудования которого представлен в [53]. В течение всего

рассматриваемого периода выполнялись ежемесячные полеты над южными районами Западной Сибири. В сентябре 2022 г. был проведен уникальный эксперимент по измерению состава воздуха, включая озон. Он заключался в проведении зондирования с переменным профилем по высоте в меридиональном направлении. Маршрут начался вблизи 56° с.ш. и закончился над акваторией Карского моря вблизи 75° с.ш., где осуществлялись синхронные приводные измерения на научно-исследовательском судне «Академик Мстислав Келдыш». Данные измерений над югом Западной Сибири представлены на рис. 9 (цв. вкладка). Рис. 9, *а* отражает профили в период нарастания концентрации озона в тропосфере, рис. 9, *б* дает представление о его вертикальном распределении в период уменьшения концентрации.

Из рис. 9, *а* видно, что в зимний период и в начале весны концентрация озона в нижнем слое была небольшой (20–30 млрд⁻¹), увеличивалась до 40–50 млрд⁻¹ в средней тропосфере и снова снижалась в верхней. Такой вертикальный профиль говорит о том, что процессы обмена между тропосферой и стратосферой были в этот период незначительными.

В середине и конце весны концентрация озона в пограничном слое поднялась до 40–50 млрд⁻¹ за счет усиления фотохимических процессов. Высокие значения в верхней тропосфере свидетельствуют об усилении процессов обмена со стратосферой.

В условиях умеренного обмена воздуха между тропосферой и стратосферой (рис. 9, *б*) во второй половине года за счет фотохимической генерации содержание озона в средней тропосфере достигает 50–55 млрд⁻¹. В ноябре-декабре концентрация падала во всей тропосфере.

На рис. 10 (цв. вкладка) приведены данные, полученные в ходе меридионального полета. В легенде перечислены пункты, над которыми происходило снижение самолета-лаборатории. Самым южным был аэропорт Новосибирска, самым северным —

корабль «Академик Мстислав Келдыш». Видно, что, несмотря на большое расстояние между пунктами измерений (56–74° с.ш.), концентрации озона в период эксперимента в нижней и средней тропосфере почти не отличались. Максимальные различия в этом слое атмосферы достигали 20 млрд⁻¹.

В верхней тропосфере над южными и северными районами располагались высотные фронтальные зоны. Из рис. 10 видно, что над Новосибирском и Салехардом самолет пересекал тропопаузу, что следует из резкого роста концентрации озона, над Карским морем, очевидно, пересек «складку» тропопаузы.

Таким образом, если сопоставить представленные на рис. 9 и 10 вертикальные распределения с ранее полученными результатами для этого же региона [54–56], то можно прийти к выводу, что они находятся в середине диапазона возможной многолетней изменчивости. Подобный результат получен и нашими китайскими коллегами [57]. Низкие значения в Арктике, возможно, связаны с истощением тропосферного озона [58].

4. Соответствие концентрации озона в России гигиеническим нормативам

В табл. 3 приведены количественные показатели превышения гигиенических нормативов, установленных для Российской Федерации в [37].

Из данных табл. 3 следует, что среднесуточная приземная концентрация озона может превышать значение ПДК_{сс} на всей охваченной измерениями территории РФ. Причем превышение значительно изменяется по пространству и может составлять от 20 до 100%. Более того, за исключением Троицка и Тарусы, повсеместно может быть превышен порог 2ПДК_{сс} — от 0,5 до 82%. На большинство станций (13 из 18) часто превышает и 3ПДК_{сс}. В Санкт-Петербурге и Боярске зафиксировано даже превышение 5ПДК.

Таблица 3

Превышение предельно допустимых концентраций озона в России в 2022 г.

Станция	> 1ПДК, %	> 2ПДК, %	> 3ПДК, %	> 5ПДК, %	ПДК _{рз} , количество случаев превышения	ПДК _{мр} , количество случаев превышения	Количество дней измерений
БЭК	84,8	41,4	19,2		53	3	355
TOR-станция	87,6	38,7	9,4		26	2	362
Фоновая	54,8	19,1					325
ОПТЭК-N	30,6	1,1					360
ОПТЭК-P	61,6	18,2	0,6				352
ОПТЭК-PR	76,1	17,3	6,3	1,6	16	10	318
ОПТЭК-Карелия	76,7	32,7	2,9		9		245
Карадаг	94,3	42,0	1,0				300
КВНС	97,3	68,6	1,8				334
Листвянка	95,6	50,8	10,7		12	1	364
Апатиты	85,4	34,3	0,6				356
Боярск	100,0	82,0	28,7	0,8	19	5	122
Улан-Удэ	74,0	24,7	1,4				73
Москва (РУДН)	39,5	0,5			1		365
Троицк	20,3						301
Таруса	31,0						365
Вятские Поляны	86,3	46,8	11,2		8	6	365
Обнинск	69,4	13,3	0,3				360

Понятие ПДК рабочей зоны для озона несколько расширено, поскольку он не выбрасывается определенными антропогенными источниками, а образуется непосредственно в атмосфере из газов-прекурсоров, которые могут попасть в воздух вне пределов самой зоны. Тем не менее в Томской области превышение ПДК_{рз} зафиксировано 53 раза в районе БЭКа и 26 раз в районе ТОР-станции. В Санкт-Петербурге (ОПТЭК-РР) ПДК_{рз} превышалась в 2022 г. 16 раз, в Карелии — 9, Листвянке — 12, Боярске — 19 и в Вятских Полянах — 8 раз. Следует отдельно упомянуть станцию РУДН в Москве. В 2021 г. ПДК_{рз} на ней превышалось 145 раз, а в 2022 г. — всего 1. Это подчеркивает, насколько может отличаться ситуация в разные годы.

Почти неизменным осталось количество станций, на которых превышалась максимальная разовая ПДК_{мр} = 160 мкг/м³. В 2021 г. их было 5, в 2022 — 6. Важно подчеркнуть, что в 2022 г. добавилось две станции. ПДК_{мр} превышалось в районе г. Томска 3 и 2 раза, в Санкт-Петербурге — 10, Листвянке — 1, Боярске — 5 и Вятских Полянах — 6. В Москве в 2021 г. в период летнего смога ПДК_{мр} было превышено 402 раза, в то время как в 2022 г. — ни одного раза.

Таким образом, проведенное исследование показывает, что в большинстве регионов России требуется проведение природоохранных мероприятий по снижению уровня концентрации тропосферного озона.

Заключение

Анализ количества и расположения станций мониторинга озона показывает, что пока они охватывают только третью часть территории России. Следовательно, крайне необходимо расширение площади покрытия страны пунктами мониторинга, особенно в фоновых и южных районах.

Значение приземной концентрации озона в России в 2022 г. находилось на среднем уровне и было соизмеримо с его содержанием в ряде развитых государств. Тем не менее во всех пунктах измерений превышались предельно допустимые среднесуточные концентрации, установленные отечественным гигиеническим нормативом. В отдельных регионах фиксируется превышение предельно допустимых концентраций рабочей зоны и максимальных разовых среднечасовых концентраций. В сложившейся ситуации необходимо широко информировать население о результатах мониторинга и возможных последствиях превышения гигиенического норматива, а также выработать природоохранные мероприятия по снижению уровня концентрации озона в приземном слое воздуха.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственных заданий РУДН, ИОА СО РАН (регистрационный № 121031500342-0), ПГИ РАН, ИФА РАН (регистрационный № 129-2022-0012), ИФМ СО РАН, ИОФ РАН, ГМИЦ, КНС — ПЗ РАН филиал ФИЦ ИнБЮМ (№ 121032300023-7), ГПБУ «Мосэкомониторинг», ЛИН СО РАН (регистрационный № 0279-2021-0014), АО «ОПТЭК», НПО «Тайфун».

Список литературы

1. Лукин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. Физическая химия озона. М.: МГУ, 1998. 480 с.
2. Перов С.П., Хргиан А.Х. Современные проблемы атмосферного озона. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 288 с.
3. Разумовский С.В., Зайков Г.Е. Озон и его реакции с органическими соединениями (кинетика и механика). М.: Наука, 1974. 322 с.
4. Филов В.А. ред. Вредные химические вещества. Неорганические соединения V–VIII групп. Л.: Химия, 1989. 592 с.
5. Белан Б.Д. Озон в тропосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 488 с.
6. Lelieveld J., Evans J.S., Fnais M., Giannadaki D., Pozzer A. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale // *Nature*. V. 525, N 7569. P. 367–371.
7. Mauzerall D.L., Wang X. Protecting agricultural crops from the effects of tropospheric ozone exposure: Reconciling science and standard setting in the United States, Europe, and Asia // *Ann. Rev. Energy Environ.* 2001. N 26. P. 237–268.
8. Air pollution takes a big bite out of Asia's grain crops // *Nature*. 2022. V. 601, N 7894. P. 487.
9. Wang B., Shugart H.H., Lerdau M.T. Sensitivity of global greenhouse gas budgets to tropospheric ozone pollution mediated by the biosphere // *Environ. Res. Lett.* 2017. V. 12, N 8. P. 084001.
10. Anav A., De Marco A., Collalti A., Emberson L., Feng Z., Lombardozzi D., Sicard P., Verbeke T., Viovy N., Vitale M., Paoletti E. Legislative and functional aspects of different metrics used for ozone risk assessment to forests // *Environ. Pollut.* 2022. V. 295. P. 118690.
11. Altshuller A.P., Wartburg A.F. The interaction of ozone with plastic metallic materials in a dynamic flow system // *Intern. J. Air Water Pollut.* 1961. V. 4, N 1–2. P. 70–78.
12. Daubendick R.L., Calvert J.G. The reaction of ozone with perfluorinated polyolefins // *Environ. Lett.* 1974. V. 6, N 4. P. 253–272.
13. Screpani A., DeMarco A. Corrosion on cultural heritage buildings in Italy: A role for ozone? // *Environ. Pollut.* 2009. V. 157, N 5. P. 1513–1520.
14. Coleman B.K., Destailats H., Hodgson A.T., Nazaroff W.W. Ozone consumption and volatile byproduct formation from surface reactions with aircraft cabin materials and clothing fabrics // *Atmos. Environ.* 2008. V. 42, N 4. P. 642–654.
15. Rice R.G. Century 21 — pregnant with ozone // *Ozone Sci. Engen.* 2002. V. 24, N 1. P. 1–15.
16. Rowlinson M.J., Rap A., Hamilton D.S., Pope R.J., Hantson S., Arnold S.R., Kaplan J.O., Arneth A., Chipperfield M.P., Forster P.M., Nieradzik L. Tropospheric ozone radiative forcing uncertainty due to pre-industrial fire and biogenic emissions // *Atmos. Chem. Phys.* 2020. V. 20, N 18. P. 10937–10951.
17. Leung F., Sitch S., Tai A.P.K., Wiltshire A.J., Gornall J.L., Folberth G.A., Unger N. CO₂ fertilization of crops offsets yield losses due to future surface ozone damage and climate change // *Environ. Res. Lett.* 2022. V. 17, N 7. P. 074007.
18. Zhang J., Gao Y., Leung L.R., Luo K., Wang M., Zhang Y., Bell M.L., Jianren Fan J. Isolating the modulation of mean warming and higher-order temperature changes on ozone in a changing climate over the contiguous United States // *Environ. Res. Lett.* 2022. V. 17, N 9. P. 094005.
19. Zhang X., Waugh D.W., Kerr G.H., Miller S.M. Surface ozone-temperature relationship: The meridional gra-

- dient ratio approximation // *Geophys. Res. Lett.* 2022. V. 49, N 13. P. e2022GL098680.
20. Zannoni N., Lakey P.S.J., Won Y., Shiraiwa M., Rim D., Weschler C.J., Wang N., Ernle L., Li M., Bekö G., Wargocki P., Williams J. The human oxidation field // *Science*. 2022. V. 377, N 6610. P. 1071–1077.
 21. Langford A.O., Senff C.J., Alvarez II R.J., Aikin K.C., Baidar S., Bonin T.A., Brewer W.A., Brioude J., Brown S.S., Burley J.D., Caputi D.J., Conley S.A., Cullis P.D., Decker Z.C.J., Evan S., Kirgis G., Lin M., Pagowski M., Peischl J., Petropavlovskikh I., Pierce R.B., Ryerson T.B., Sandberg S.P., Sterling C.W., Weickmann A.M., Zhang L. The Fires, Asian, and Stratospheric Transport – Las Vegas Ozone Study (FAST-LVOS) // *Atmos. Chem. Phys.* 2022. V. 22, N 3. P. 1707–1737.
 22. Kim S.-W., McDonald B.C., Seo S., Kim K.-M., Trainer M. Understanding the paths of surface ozone abatement in the Los Angeles basin // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2022. V. 127, N 4. P. e2021JD035606.
 23. Gouldsbrough L., Hossaini R., Eastoe E., Young P.Y. A temperature dependent extreme value analysis of UK surface ozone, 1980–2019 // *Atmos. Environ.* 2020. V. 273. P. 118975.
 24. Cao J., Qiu X., Liu Y., Yan X., Gao J., Peng L. Identifying the dominant driver of elevated surface ozone concentration in North China Plain during summertime 2012–2017 // *Environ. Pollut.* 2022. V. 300. P. 118912.
 25. Wu K., Wang Y., Qiao Y., Liu Y., Wang S., Yang X., Wang H., Lu Y., Zhang X., Lei Y. Drivers of 2013–2020 ozone trends in the Sichuan basin, China: Impacts of meteorology and precursor emission changes // *Environ. Pollut.* 2022. V. 300. P. 118914.
 26. Gao J., Li Y., Xie Z., Hue B., Wang L., Bao F., Fan S. The impact of the aerosol reduction on the worsening ozone pollution over the Beijing–Tianjin–Hebei region via influencing photolysis rates // *Sci. Total Environ.* 2022. V. 821. P. 153197.
 27. Derwent R.G., Parrish D.D. Analysis and assessment of the observed long-term changes over three decades in ground-level ozone across north-west Europe from 1989–2018 // *Atmos. Environ.* 2022. V. 286. P. 119222.
 28. Мосэкомониторинг. URL: <https://mosecom.mos.ru/>.
 29. Официальный сайт мэра Москвы. URL: <https://www.mos.ru/eco/documents/doklady/view/>.
 30. Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А. Статников В.А. Содержание озона над территорией Российской Федерации в 2018 г. // *Метеорол. и гидрол.* 2019. № 2. С. 136–142.
 31. Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Лезина Е.А. Содержание озона над территорией Российской Федерации в 3-м квартале 2022 г. // *Метеорол. и гидрол.* 2022. № 11. С. 138–142.
 32. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2020 год. М.: Росгидромет, 2021. 205 с.
 33. Обзор фоновое состояние окружающей природной среды на территории стран СНГ за 2021 г. М.: Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля, 2022. 115 с.
 34. Андреев В.В., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., 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., 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., Zayakhanov A.S., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Kotelnikov S.N., Kuznetsova I.N., Lapchenko V.A., Lezina E.A., Postilyakov O.V., Savkin D.E., Senik I.A., Stepanov E.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V., Chelibanov I.V., Shiroto 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.
 35. 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., Широтов В.В., Шукуров К.А. Приземная концентрация озона на территории России во втором полугодии 2020 г. // *Оптика атмосф. 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., Postilyakov O.V., Savkin D.E., Senik I.A., Stepanov E.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V., Chelibanov I.V., Chelibanov V.P., Shiroto V.V., Shukurov K.A. Surface ozone concentration in Russia in the second half of 2020 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, N 4. P. 347–356.
 36. 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., Коновальцева Л.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., Фофанов А.В., Ходжер Т.В., Челибанов И.В., Челибанов В.П., Широтов 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; Andreev V.V., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., Demin V.I., Dudorova N.V., Elansky N.F., Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Konovaltseva L.V., Kotelnikov S.N., Kuznetsova I.N., Lapchenko V.A., Lezina E.A., Obolkin V.A., Postilyakov O.V., Potemkin V.L., Savkin D.E., Senik I.A., Stepanov E.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V., Khodzher T.V., Chelibanov I.V., Chelibanov V.P., Shiroto V.V., Shukurov K.A. Tropospheric ozone concentration on the territory of Russia in 2021 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35, N 6. P. 741–757.
 37. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Утвержден постановлением № 2 Главного государственного санитарного врача Российской Федерации 28.01.2021. 1142 с.
 38. Исидоров В.А. Органическая химия атмосферы. СПб.: Химиздат, 2001. 352 с.
 39. Shi S., Zhu B., Tang G., Liu C., An J., Liu D., Xu J., Xu H., Liao H., Zhang Y. Observational evidence of aerosol radiation modifying photochemical ozone profiles in the lower troposphere // *Geophys. Res. Lett.* 2022. V. 49, N 15. P. e2022GL099274.
 40. Zhang X., Xub W., Zhang G., Lin W., Zhao H., Ren S., Zhou G., Chen J., Xu X. First long-term surface ozone variations at an agricultural site in the North China Plain: Evolution under changing meteorology and emissions // *Sci. Total. Environ.* 2023. V. 860. P. 160520.

41. Li C., Li F., Cheng Q., Guod Y., Zhang Z., Liu X., Qud Y., An J., Liu Y., Zhang S. Divergent summer-time surface O₃ pollution formation mechanisms in two typical Chinese cities in the Beijing–Tianjin–Hebei region and Fenwei Plain // *Sci. Total. Environ.* 2023. V. 870. P. 161868.
42. Сенник 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. и океана.* 2005. Т. 41, № 1. С. 78–91.
43. Shakina N.P., Ivanova A.R., Elansky N.F., Markova T.A. Transcontinental observations of surface ozone concentration in the TROICA experiments: 2. The effect of the stratosphere–troposphere exchange // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2001. V. 37, suppl. 1. P. S39–S48.
44. Еланский Н.Ф. О механизме воздействия струйного течения на озонный слой // *Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана.* 1975. Т. 11, № 9. С. 916–925.
45. Ueno H., Tsunematsu N. Sensitivity of ozone production to increasing temperature and reduction of precursors estimated from observation data // *Atmos. Environ.* 2019. V. 214. P. 116818.
46. Qian W., Xu M., Ai Y. Anomaly-based synoptic analysis to identify and predict meteorological conditions of strong ozone events in North China // *Air Quality, Atmos. Health.* 2022. V. 15, N 10. P. 1699–1711.
47. Zhang J., Gao Y., Leung L.R., Luo K., Wang M., Zhang Y., Bell M.L., Fan J. Disentangling the mechanism of temperature and water vapor modulation on ozone under a warming climate // *Environ. Res. Lett.* 2022. V. 7, N 12. P. 124032.
48. Sadeghi B., Ghahremanloo M., Mousavinezhad S., Lops Y., Pouyaei A., Choi Y. Contributions of meteorology to ozone variations: Application of deep learning and the Kolmogorov–Zurbenko filter // *Environ. Pollut.* 2022. V. 310. P. 119863.
49. Mousavinezhad S., Ghahremanloo M., Choi Y., Pouyaei A., Khorshidian N., Sadeghi B. Surface ozone trends and related mortality across the climate regions of the contiguous United States during the most recent climate period, 1991–2020 // *Atmos. Environ.* 2023. V. 300. P. 119693.
50. Hertig E., Jahn S., Kaspar-Ott I. Future local ground-level ozone in the European area from statistical downscaling projections considering climate and emission changes // *Earth's Future.* 2023. V. 11, N 2. P. e2022EF003317.
51. Yao Y., Ma K., He C., Zhang Y., Lin Y., Fang F., Li S., He H. Urban surface ozone concentration in Mainland China during 2015–2020: Spatial clustering and temporal dynamics // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2023. V. 20, N 2. P. 3810.
52. Анохин Г.Г., Антохин П.Н., Аришинов М.Ю., Барсук В.Е., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов В.С., Морозов М.В., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Пестунов Д.А., Сиков Г.П., Симоненков Д.В., Синицын Д.С., Толмачев Г.Н., Филиппов Д.В., Фофонов А.В., Чернов Д.Г., Шаманов В.С., Шмаргунов В.П. Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик» // *Оптика атмосф. и океана.* 2011. Т. 24, № 9. С. 805–816.
53. Belan B.D., Ancellet G., Andreeva I.S., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Y., Balin Y.S., Barsuk V.E., Belan S.B., Chernov D.G., Davydov D.K., Fofonov A.V., Ivlev G.A., Kotel'nikov S.N., Kozlov A.S., Kozlov A.V., Law K., Mikhailchishin A.V., Moseikin I.A., Nasonov S.V., Nédélec P., Okhlopko O.V., Ol'kin S.E., Panchenko M.V., Paris J.-D., Penner I.E., Ptashnik I.V., Rasskazchikova T.M., Reznikova I.K., Romanovskii O.A., Safatov A.S., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Yakovlev S.V., Zenkova P.N. Integrated airborne investigation of the air composition over the Russian sector of the Arctic // *Atmos. Meas. Tech.* 2022. V. 15, N 13. P. 3941–3967.
54. Антохин П.Н., Аришинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н. Многолетняя изменчивость озона и аэрозоля в районе Томска и оправдываемость прогноза их среднегодовых концентраций на десятилетие // *Оптика атмосф. и океана.* 2010. Т. 23, № 9. С. 772–776.
55. Белан Б.Д., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Вертикальное распределение озона в тропосфере над югом Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2010. Т. 23, № 9. С. 777–783; Belan B.D., Tolmachev G.N., Fofonov A.V. Vertical ozone distribution in troposphere above south regions of West Siberia // *Atmos. Ocean. Opt.* 2011. V. 24, N 2. P. 181–187.
56. Антохин П.Н., Белан Б.Д. Регулирование динамики тропосферного озона через стратосферу // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 10. С. 890–895; Antokhin P.N., Belan B.D. Control for dynamics of the tropospheric ozone through stratosphere // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 26, N 3. P. 207–213.
57. Chen Z., Xie Y., Liu J., Shen L., Cheng X., Han H., Yang M., Shen Y., Zhao T., Hu J. Distinct seasonality in vertical variations of tropospheric ozone over coastal regions of southern China // *Sci. Total Environ.* 2023. V. 874. P. 162423.
58. Cao L., Li S., Gu Y., Luo Y. A three-dimensional simulation and process analysis of tropospheric ozone depletion events (ODEs) during the springtime in the Arctic using CMAQ (Community Multiscale Air Quality Modeling System) // *Atmos. Chem. Phys.* 2023. V. 23, N 5. P. 3363–3382.

V.V. Andreev, M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, S.B. Belan, D.K. Davydov, V.I. Demin, N.V. Dudorova, N.F. Elansky, G.S. Zhamsueva, A.S. Zayakhanov, R.V. Ivanov, G.A. Ivlev, A.V. Kozlov, L.V. Konovaltseva, M.Yu. Korenskiy, S.N. Kotel'nikov, I.N. Kuznetsova, V.A. Lapchenko, E.A. Lezina, V.A. Obolkin, O.V. Postilyakov, V.L. Potemkin, D.E. Savkin, E.G. Semutnikova, I.A. Senik, E.V. Stepanov, G.N. Tolmachev, A.V. Fofonov, T.V. Khodzher, I.V. Chelibanov, V.P. Chelibanov, V.V. Shirovov, K.A. Shukurov. **Tropospheric ozone concentration in Russia in 2022.**

The work considers the distribution of tropospheric ozone in Russia in 2022 according to 33 stations located in different physical and geographical zones, as well as its vertical distribution according to the results of aircraft sensing. It was shown that ozone concentration stations the maximum permissible daily average concentrations established by the domestic hygienic standard at all exceed. In some regions, the maximum permissible concentrations of the working zone and the maximum one-time hourly average concentrations are exceeded. The current situation causes the need to widely inform the population about the monitoring results and develop environmental measures to reduce the level of ozone concentration in the surface air layer.

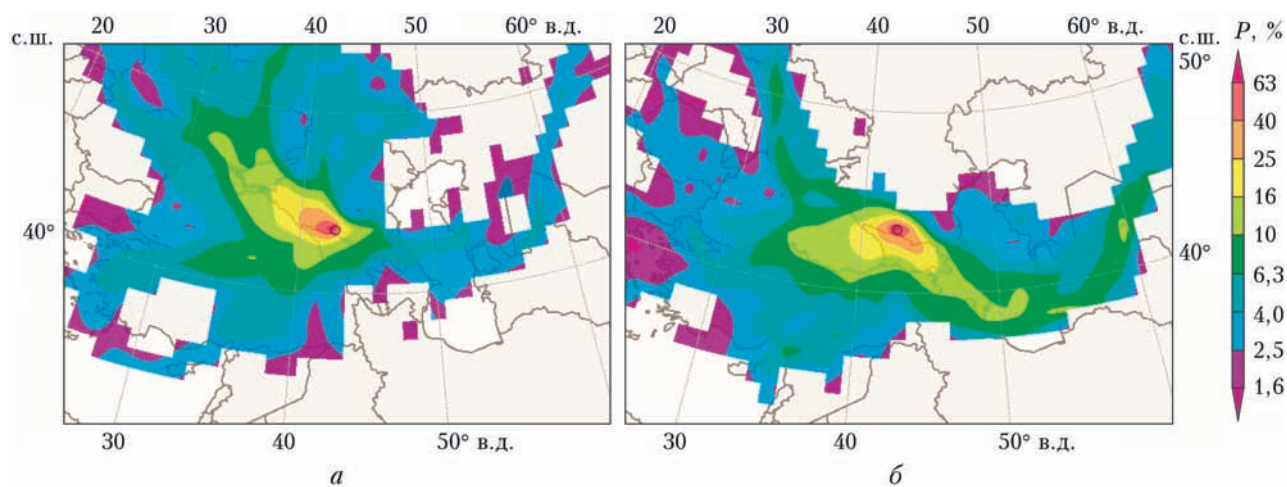


Рис. 7. Вероятность прохождения элементарных воздушных масс, связанных с 10% самых низких (а) и 10% самых высоких (б) аномалий концентрации приземного озона на КВНС в 2022 г., над различными территориями

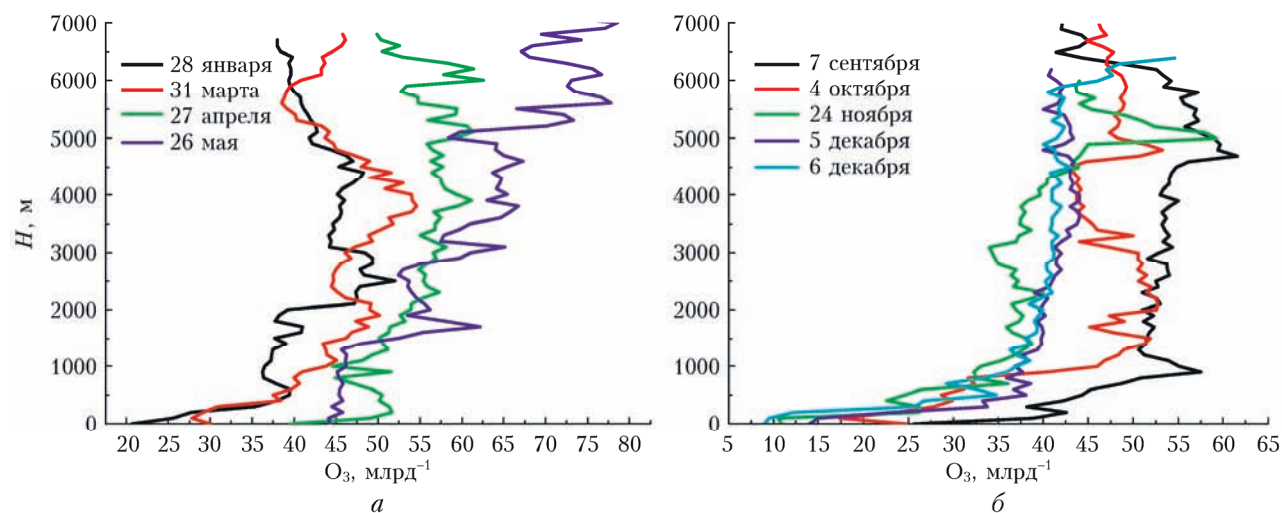


Рис. 9. Вертикальное распределение озона над югом Западной Сибири (г. Новосибирск) в 2022 г.

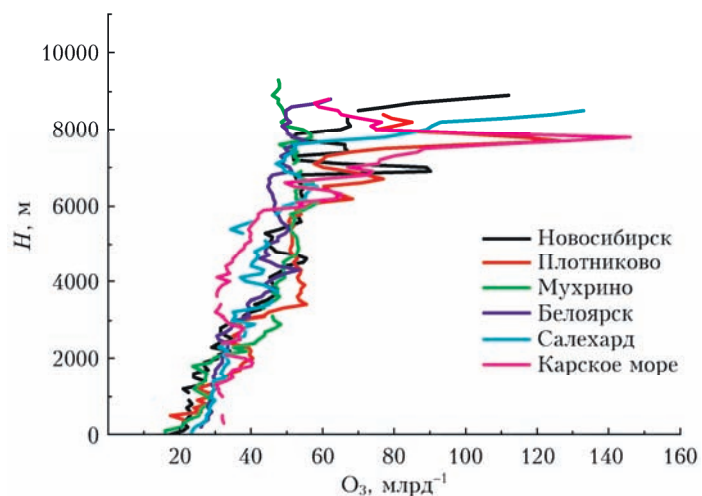


Рис. 10. Вертикальное распределение озона 8–11 сентября 2022 г. вдоль меридиана