

Концентрация тропосферного озона на территории России в 2023 г.

В.В. Андреев¹, М.Ю. Аршинов², Б.Д. Белан^{✉2}, С.Б. Белан², В.А. Гордюшкин³, Д.К. Давыдов², В.И. Демин⁴, Н.В. Дудорова², Н.Ф. Еланский⁵, 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, О.О. Марченко², В.А. Оболкин¹⁰, О.В. Постыляков⁵, В.Л. Потемкин¹⁰, Д.Е. Савкин², Е.Г. Семутникова⁹, И.А. Сенник⁵, Е.В. Степанов⁶, Г.Н. Толмачев², А.В. Фофонов², Т.В. Ходжер¹⁰, И.В. Челибанов³, В.П. Челибанов³, В.В. Широтов¹¹, Ю.А. Штабкин⁵, К.А. Шукуров^{5*}

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

³Приборостроительное предприятие «ОПТЭК»
199178, г. Санкт-Петербург, Малый проспект В.О., 58

⁴Полярный геофизический институт РАН
184209, Мурманская обл. г. Апатиты, ул. Академгородок, 26а

⁵Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3, стр. 1

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

¹¹НПО «Гайфун»
249038, Калужская область, г. Обнинск, ул. Победы, 4

Поступила в редакцию 22.04.2024;
после доработки 29.05.2024;
принята к печати 11.06.2024

Озон в тропосфере в высоких концентрациях является сильнодействующим ядом и мощным окислителем, крайне негативно воздействующим на биологические объекты и объекты окружающей среды. Поэтому весьма актуально исследование динамики его концентрации во всех регионах планеты. По данным мониторинга рассматривается распределение тропосферного озона на территории России в 2023 г. в приземном слое воздуха, а также его вертикальное распределение по результатам самолетного зондирования. Показано, что во всех пунктах измерений превышались предельно допустимые среднесуточные концентрации, установленные отечественным гигиеническим нормативом: максимальные разовые, среднесуточные и среднегодовые. В связи со сложившейся ситуацией необходимы широкое информирование населения о результатах мониторинга и разработка природоохранных мероприятий по снижению уровня концентрации озона и его прекурсоров в приземном слое воздуха. Результаты работы могут быть полезны специалистам в области физики атмосферы, климатологии, охраны окружающей среды, а также административным органам разных уровней.

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); Виталий Анатольевич Гордюшкин (vit8100@yandex.ru); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru); Валерий Иванович Демин (demin@pggia.ru); Нина Викторовна Дудорова (ninosh@mail.ru); Николай Филиппович

Введение

Озон в тропосфере из-за его физико-химических свойств [1–3] и воздействия на объекты окружающей среды рассматривается в мире как загрязнитель воздуха номер один. В первую очередь он влияет на заболеваемость и преждевременную смертность населения [4], а также наносит ущерб растительности, воздействуя на посевы и лесное хозяйство [5]. Озон вносит заметный вклад в радиационный эффект, превышающий 8% от общего нагревания воздуха, обусловленного поглощением солнечного излучения парниковыми газами [6]. Сделанные к настоящему времени оценки показывают, что в условиях глобального потепления наиболее вероятен рост концентрации озона в тропосфере [7].

Озон – вторичный загрязнитель, поскольку не выбрасывается непосредственно в воздух никакими техногенными источниками [8]. Он естественным образом образуется в верхних слоях атмосферы Земли, а концентрации в нижних слоях тропосферы являются результатом баланса между переносом сверху из стратосферы, фотохимической генерацией в тропосфере, разрушением и осаждением на поверхность Земли. Следует различать механизмы генерации озона в тропосфере. В фоновых районах началом цепочки реакций является фотолиз уже имеющегося здесь или поступившего из стратосферы озона. Возникающий в процессе реакции возбужденный атом кислорода взаимодействует с водяным паром, образуя гидроксил, окисляющий оксид углерода или органические газы. В ходе цепочки реакций образуется озон. В загрязненных районах его фотохимическое образование – результат химических реакций между оксидами азота (NO_x) и летучими органическими соединениями при солнечном свете.

Многообразие возможных отрицательных последствий от увеличения концентрации тропосферного озона привело к тому, что во многих странах запущены долговременные программы уменьшения концентрации озона и его газов-предшественников. Европейский Союз, например, определил несколько стандартов для характеристики эпизодов загрязнения, вызванного озоном: порог информации и оповещения; показатель АОТ40 для защиты растительности [9]. Кроме того, предложен специальный показатель для оценки воздействия O_3 на здоровье (SOMO352). Было проведено несколько исследований, посвященных анализу долгосрочных тенден-

ций качества воздуха. В глобальном масштабе выбросы прекурсоров загрязняющих веществ снижаются с 2000 г. в Северной Америке и Европе и увеличиваются в Индии и Африке. В Азии с 2012 г. наблюдается снижение выбросов, резко выросших в 2000-е гг. [10].

В бывшем СССР и нынешней России мониторингу озона и мероприятиям по уменьшению его содержания не уделялось должного внимания [11]. В настоящее время Росгидромет, на который возложена обязанность по мониторингу качества атмосферы, в результате технологической модернизации наблюдательной сети начал измерения приземного озона в ряде крупных и промышленных городов. Впервые данные о приземном озоне включены в ежегодник «Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России» [12]. Согласно [12] мониторинг осуществляется на 53 станциях в 17 городах. На остальной территории РФ наблюдения за озоном проводятся в инициативном порядке, в основном научными организациями или университетами, исключение составляет сеть наблюдений «Москэкомониторинг» в Москве. Сложившийся неформальный консорциум таких организаций начал публиковать ежегодные обзоры, в которых представлена информация о содержании озона в тропосфере в некоторых регионах России [13–16].

Настоящая статья является продолжением вышеупомянутой серии обзоров. Ее цели: сбор в одной публикации данных о содержании озона в приземном слое воздуха в 2023 г. в различных регионах России, сравнительный анализ таких данных и их соотнесение с отечественными гигиеническими нормативами [17].

1. Сеть станций

В табл. 1 приведены общие характеристики станций, данные которых включены в настоящий обзор. В 2023 г. список уменьшился, так как на двух станциях, расположенных в Бурятии, мониторинг озона не проводился из-за организационных проблем. Также не был включен в обзор короткий ряд наблюдений новой станции мониторинга, которая приступила к работе в конце 2023 г. в центре Москвы в Институте общей физики РАН.

Данные измерений на перечисленных в табл. 1 станциях дополнены средними значениями для постов городского и транспортного типов сети Мосэкомониторинга. Их список представлен в [16].

Еланский (n.f.elansky@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); Олеся Олеговна Марченко (marchenko@nnc.kz); Владимир Аркадьевич Оболкин (obolkin@lin.irk.ro); Олег Вадимович Постыляков (oleg.postylyakov@gmail.com); Владимир Льво-

вич Потемкин (klimat@lin.irk.ru); Денис Евгеньевич Савкин (sde@iao.ru); Евгения Геннадьевна Семутникова (egsemutnikova@mail.ru); Ирина Анатольевна Сеник (senik_ia@list.ru); Евгений Валерьевич Степанов (EugeneStepanov@yandex); 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); Юрий Александрович Штабкин (yuryshtabkin@gmail.com); Карим Абдухакимович Шукуров (karim.shukurov@ifaran.ru).

Перечень станций, осуществляющих мониторинг озона в приземном слое воздуха в России

№	Станция	Регион	Координаты		Высота, 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-Н	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

Описание большинства станций, оборудования, установленного на них, и режима работы приводилось в ранее опубликованных обзорах [13–16] по мере ввода их в эксплуатацию. Таким образом, в настоящей работе представлены результаты мониторинга на 18 станциях.

Из табл. 1 видно, что станции, измеряющие приземную концентрацию озона (ПКО), расположены на территории всего лишь 12 субъектов Российской Федерации (РФ). Это меньше седьмой части от общего количества субъектов РФ. Для такой огромной страны, как Россия, этого количества недостаточно.

По типу окружающей среды станции можно разделить на городские (7) и фоновые (6). Две

станции относятся к пригородным и одна к высокогорным. Самой западной является ОПТЭК-PR, восточной – Листвянка. Наиболее северная из приземных станций – Апатиты, южная – Карадаг.

2. Результаты мониторинга приземной концентрации озона

2.1. Среднегодовые данные

На рис. 1 приведены среднегодовые концентрации озона, измеренные на станциях в 2023 г. Вертикальными отрезками показано среднеквадратичное отклонение от среднего.

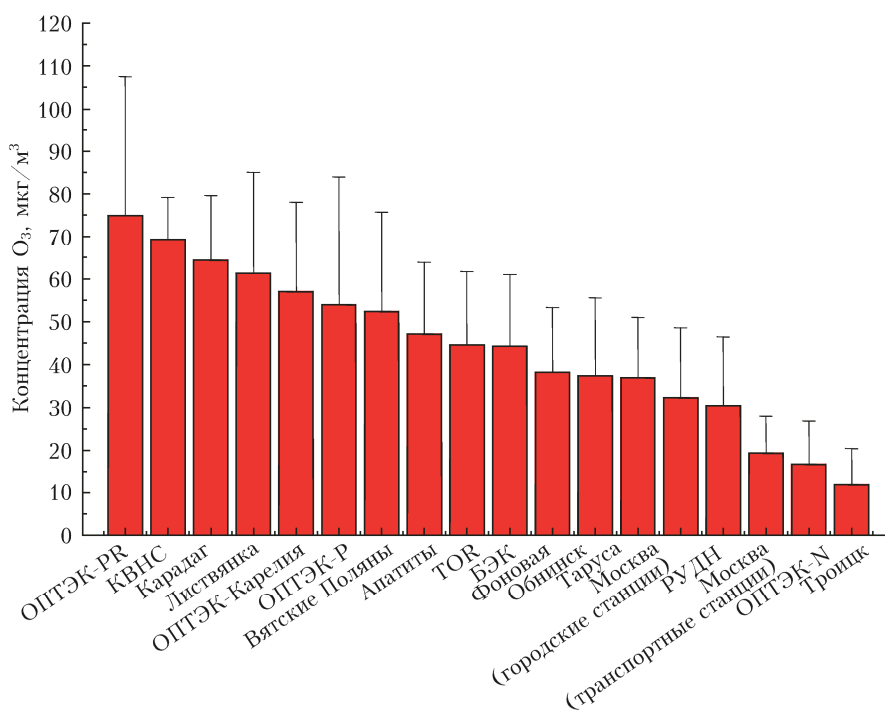


Рис. 1. Среднегодовые концентрации озона в 2023 г.

Из рис. 1 видно, что среднегодовые концентрации ПКО в 2023 г. различались на территории России более чем в шесть раз. Наибольшие значения фиксировались на станциях ОПТЭК-PR, КВНС, Карадаг, Листвянка, ОПТЭК-Карелия, ОПТЭК-Р и Вятские Поляны. Наименьшие — в Москве на транспортных станциях, на станциях ОПТЭК-N и Троицк. В 13 из 18 пунктов измерений превышена среднегодовая предельно допустимая концентрация (ПДК_{ср.}) озона, равная 30 мкг/м³ [17]. По-видимому, в городских условиях на величине среднегодовой ПКО сказывается уничтожение озона из-за выхлопов автотранспорта, наиболее ярко проявляющееся в ночные часы.

На большинстве станций мониторинг озона в рамках нашего консорциума осуществлялся в течение четырех лет. Рис. 2 (цв. вкладка) демонстрирует, как изменялась среднегодовая концентрация озона в период 2020–2023 гг. Видно, что изменение среднегодовых ПКО на большинстве станций имеет переменный характер. В отдельных пунктах можно увидеть тенденцию к росту концентраций. К таким относятся ОПТЭК-PR, ОПТЭК-Р, ОПТЭК-Карелия, Листвянка и Обнинск. Только одна станция демонстрирует тенденцию к уменьшению — ОПТЭК-N. ПКО изменяется от года к году на 20–30%, достигая разницы в два раза в Москве (РУДН). Пока небольшая длина рядов измерений не позволяет делать выводы об устойчивых тенденциях изменения концентраций.

2.2. Годовой ход

Анализ динамики годового хода проведен по среднесуточным и максимальным за сутки средним за восемь часов значениям. Они представлены на рис. 3 (цв. вкладка). Станции на рис. 3 расположены в последовательности от наибольшей годовой концентрации озона в приземном слое воздуха к минимальной в соответствии с данными рис. 1. Горизонтальными линиями показаны уровни предельных среднесуточных концентраций (ПДК_{ср.}) для оценки периодов превышения гигиенических нормативов. Ниже будут приведены количественные характеристики таких превышений.

В гигиеническом нормативе [17] среднесуточная ПДК заменена на новый показатель — средняя за восемь часов концентрация озона. Он введен Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) и широко используется в зарубежных странах. При этом отечественный норматив не указывает, как определяется эта величина. Если средняя за восемь часов концентрация рассчитывается путем скользящего среднего, тогда возникает вопрос: какое из 24 полученных значений использовать? Согласно руководящим документам ВОЗ [18] для озона принято рассчитывать суточный максимум средних за восемь часов концентраций, а не средние значения за 24 ч из-за сильных суточных колебаний его содержания. Таким образом, из 24 значений выбирается максимальное для конкретных суток.

Обычно оно обозначается МДА8 (Maximum diurnal average).

Наибольшая среднегодовая концентрация озона в 2023 г. наблюдалась в Санкт-Петербурге на станции ОПТЭК-PR (рис. 3). В годовом ходе максимальные значения фиксировались в конце весны и летом и более чем в два раза превышали МДА8. Минимальные величины ПКО были в конце осени — начале зимы. Хотя по табл. 1 эта станция относится к фоновым, годовой ход на ней характерен скорее для городского типа.

Из-за высокогорного расположения на КВНС наблюдается особенный годовой ход приземного озона. Большую часть времени станция находится в воздухе свободной атмосферы [13], так как горнодолинная циркуляция северного склона обширного плато Шаджатмаз, на юге которого расположена КВНС, не создает ощутимого подъема воздуха из долины. Горный рельеф способствует переносу обогащенного озоном воздуха из верхних слоев тропосферы. 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 — начало зимы [19]. Особенностью 2023 г., как и 2022 г., стала невыраженность весеннего максимума. В период летних максимумов 2022 и 2023 гг. абсолютные среднечасовые содержания озона достигали 117 мкг/м³, что меньше зарегистрированных в 2020 и 2021 гг. максимумов, превысивших 140 мкг/м³ [13–16]. Наблюдаемые высокие концентрации озона могут быть связаны со стратосферными вторжениями в свободную тропосферу и последующим перемешиванием в зоне орографических возмущений [20, 21]. Как правило, подобные события имеют небольшую продолжительность — от одного до нескольких часов. Кроме этого повышенные концентрации могут быть связаны с адвекцией озона и генерацией в загрязненном воздухе при дальнем переносе.

Для определения вклада дальнего переноса в наблюдаемые экстремальные значения был выполнен траекторный анализ приходивших на КВНС воздушных масс. Методика расчета семисуточных обратных траекторий описана в обзоре наблюдений 2020 г. [14]. Из анализа исключались траектории с влажностью более 85% в конечной точке. 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. Для экстремальных значений озона обоих знаков были оценены поля вероятности (P , %) прохождения воздушных частиц через пространственные ячейки размером 1° × 1° к КВНС. На рис. 4 (цв. вкладка) показаны поля среднегодовой вероятности переноса воздушных частиц для экстремально низких и экстремально высоких значений озона на КВНС.

Поля вероятности переноса для экстремально низких значений в 2023 г. схожи с наблюдавшимися в 2020–2022 гг. и связаны с переносом воздуха

с северо-запада. Траектории, связанные с экстремально низкими приземными концентрациями, каждый год с наибольшей вероятностью пролегли над Краснодарским краем, Азовским морем и Приазовьем. В 2023 г. экстремально высокие концентрации приземного озона на КВНС, как и в 2020–2022 гг., в основном обусловлены переносом воздуха с южных направлений. В 2023 г. более отчетливо проявился юго-западный кластер воздушных масс из Турции и Ближнего Востока, а юго-восточный кластер траекторий из Азербайджана и Южного Каспия оказался менее выраженным. 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. Прохождение воздушных масс над этими районами, наряду с перемешиванием в зоне орографических возмущений, может являться причиной зарегистрированных повышенных значений [16]. Кроме этого, в 2022 г. появился, а в 2023 г. стал еще более отчетливо выражен кластер траекторий с северо-западного направления из района Донбасса [16]. Возможно, это связано с увеличенным образованием продуктов горения в этой зоне.

В дополнение к траекторному анализу было проведено численное моделирование процессов в этом регионе. Для расчетов использовалась региональная химико-климатическая модель WRF-Chem с химическим блоком GEOS-Chem (WRF-GC 2.0), которая представляет собой взаимное сопряжение метеорологической модели WRF версии 3.9.1.1 (Weather Research and Forecasting model, <https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf>) с химико-транспортной моделью GEOS-Chem версии 2.7.2 (Goddard Earth Observing System chemical model, <http://acmg.seas.harvard.edu/geos/>). Задание антропогенных и биогенных эмиссий, а также выбросов от природных пожаров выполнялось по данным CEDS, MEGAN 2.1 и GFED 4.2 соответственно. Для задания начальных и граничных условий использовались метеорологические данные GDAS и результаты вычислений по глобальной химико-транспортной модели GEOS-Chem. Расчеты выполнены для летнего (июль, рис. 5, а, цв. вкладка) и зимнего (декабрь, рис. 5, б) месяцев 2023 г. в Северо-Кавказском регионе для двух доменов, вложенных один в другой. При этом для большего домена горизонтальное разрешение модели составляло 20 км, для меньшего – 5 км. Выбор такой сетки обусловлен как необходимостью оценить влияние пространственного разрешения модели на результаты расчетов, так и экономичностью счета.

Расчитанные концентрации озона для июля близки к измеренным. Коэффициент корреляции среднечасовых величин равен 0,40. Такое заметное согласование рядов данных говорит прежде всего о близости использованных в модели эмиссий к их реальным значениям и о незначительном их влиянии на результаты моделирования. При этом обра-

щает на себя внимание то, что результаты расчетов для доменов 20 и 5 км практически совпадают. Объяснением этого факта и высокой корреляции для станции, находящейся в сложных орографических условиях, является ее расположение на плато в верхней части пограничного слоя атмосферы, граница которого в этом районе в летнее время по данным аэрологического зондирования находится на высотах 2000–2500 м. Местные источники примесей незначительны; если региональные выбросы на нижележащей населенной территории Северного Кавказа и достигают КВНС, то размыты во времени и пространстве в результате адвективного и вертикального перемешивания. Таким образом, есть основание утверждать, что КВНС – фоновая станция, отражающая региональный и, возможно, характерный для широтного пояса режим озона в нижней тропосфере.

В декабре согласование модельных и измеренных концентраций озона значительно хуже, коэффициент корреляции равен 0,27. Основными причинами рассогласованности являются недостаточно точный учет моделью активизирующихся зимой динамических процессов, включая орографические возмущения, и кратковременные скачки концентрации озона, вызванные экстремальными погодными условиями, работой техники по уборке снега, эпизодическими включениями дизельной электростанции. Влияние всего вышеперечисленного, очевидно, может быть существенно снижено путем коррекции метеорологических данных и применением стандартных процедур проверки качества данных измерений озона.

Приведенные на рис. 3 данные свидетельствуют о том, что ПКО на СФЭМ «Карадаг» имеет явно выраженную сезонную изменчивость. Максимальные значения в 2023 г. наблюдались 5 июля и 5 августа в ясные безветренные дни (134 и 143 мкг/м³ соответственно), а минимальные – 22 ноября и 8 декабря (16 и 11 мкг/м³ соответственно), когда были отмечены осадки в виде дождя и влажность воздуха составляла 88%. Наибольшие концентрации приземного озона летом наблюдались при южном и юго-восточном направлениях воздушных масс относительно СФЭМ «Карадаг» – со стороны моря. Надо отметить, что СФЭМ «Карадаг» в нашем обзоре – самая южная станция из измеряющих приземный озон, за исключением высокогорной станции Кисловодск.

На ст. Листвянка средний уровень концентрации озона в 2023 г. и его годовой ход был таким же, как и в 2021–2022: максимум – весной (80–90 мкг/м³), минимум – летом и осенью (40–60 мкг/м³), что типично для годового хода большинства районов Сибири. В период максимума концентрации наблюдалось и превышение ПДК_{сс}. Существенных межгодовых различий в средних концентрациях озона за три года не выявлено. Короткопериодная изменчивость концентраций озона (межсуточная, внутрисуточная) была высокой; она связана как с природными (погодными) процессами, так и с химическими реакциями озона, прежде

всего с оксидами азота. В частности, регулярно отмечалось понижение концентраций озона, иногда до нулевых значений, из-за периодических заносов в район станции шлейфов крупных региональных угольных ТЭЦ с высокими концентрациями оксидов азота и серы.

В связи со значительными пропусками измерений на ст. ОПТЭК-Карелия судить о характере годового хода сложно (см. рис. 3), хотя по уровню среднегодовой концентрации эта станция оказалась на пятом месте.

Динамика ПКО на ст. ОПТЭК-Р в целом идентична временной изменчивости в пункте измерений ОПТЭК-РР (см. рис. 3). Различия заключаются в амплитуде годового хода и в том, во сколько раз превышена ПДК_{сс}.

На ст. Вятские Поляны зафиксирован типичный годовой ход для фоновых районов, с максимумом весной и минимумом осенью. Особенностью здесь является превышение ПДК_{сс} уже в январе-феврале, что не наблюдалось на других станциях. При этом превышение ПДК_{сс} повторно фиксировалось летом и даже осенью.

В Апатитах (Мурманская область) в 2023 г. наиболее высокие ПКО наблюдались в апреле (см. рис. 3), что соответствует многолетнему годовому ходу озона с выраженным весенним максимумом и минимумом во второй половине лета. Максимальная ПКО была зарегистрирована в послеполуденные часы 16 апреля – 130 мкг/м³, что превысило 99-й перцентиль среднечасовых ПКО в апреле, равный 110 мкг/м³. Анализ траекторий движения воздуха показал, что эпизод с нехарактерными для региона ПКО мог быть вызван адвекцией воздуха из более южных районов (Ленинградская область, южная Карелия), где в это время года, как правило, отмечаются более высокие концентрации озона. Отметим, что зарегистрированное в Апатитах значение ПКО (130 мкг/м³) не является максимально возможным для Мурманской области: в фоновом районе (Ловозеро) в 1999–2012 гг. в апреле отмечались немного большие ПКО – 130–132 мкг/м³, а по данным расположенных на тех же широтах финских станций мониторинга максимальные ПКО могут достигать в области 160 мкг/м³. Минимальные ПКО в теплое время, как правило, наблюдаются во второй половине лета, а осенью эти концентрации несколько увеличиваются из-за усиления в регионе циклонической активности. В декабре в Апатитах традиционно наблюдается минимум озона в годовом ходе: в штиль и при слабом ветре на фоне круглосуточно устойчивой стратификации в городском воздухе происходит накопление озоноразрушающих веществ и ПКО часто снижается почти до нуля. Заметим, что аналогичный декабрьский минимум в фоновых районах области отсутствует.

Три станции, расположенные в Томской области (ТОР, БЭК и Фоновая), хотя и относятся к разным группам (городская, пригородная и фоновая), но в 2023 г. имели близкий друг к другу годовой ход (см. рис. 3). Наблюдались небольшие

различия в концентрации озона, которые рассмотрим отдельно в п. 2.4. На всех трех станциях зарегистрированы превышения МДА8 с разным количеством дней. Такое поведение содержания озона в регионе свидетельствует о небольшом вкладе антропогенных источников прекурсоров.

Обнинск хотя и относится к городским станциям, но ход концентрации там в 2023 г. был ближе к фоновым районам: максимум весной и минимум осенью. Можно отметить несколько всплесков концентрации в летнее время, что, вероятно, связано с волнами тепла, которые способствовали генерации озона из выбросов автотранспорта. В это же время фиксировалось и превышение ПДК_{сс}.

Остальные шесть станций, представленных на рис. 3, относятся к городским, здесь фиксировались минимальные среднегодовые концентрации озона.

В Московском регионе, на ст. РУДН (Центр Москвы), Троицк и Таруса в первой половине года наблюдался характерный для весенне-летнего периода значительный рост среднесуточных концентраций ПКО в мае и июне. Причем в Троицке и Тарусе весенне-летний максимум был хорошо сформированным. В середине лета на всех этих станциях отмечался период значительного снижения ПКО, а в конце лета и сентябре – вторичный максимум. Это связано с похолоданием в июле и прохождением аномальной волны тепла, начавшейся в августе и закончившейся в конце сентября.

В 2023 г. регулярные измерения приземных концентраций озона в Московском регионе осуществлялись на 22 станциях автоматического контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) «Мосэкомониторинг». Семь из них расположены в ближних пригородах, 15 – на фоновых территориях в Московской области [22]. Для анализа использованы данные 20-минутных измерений на девяти АСКЗА городского типа и шести АСКЗА транспортного типа в жилых районах и вблизи крупных магистралей Москвы в пределах МКАД. Можно выделить следующие особенности ПКО в Москве. Средняя годовая концентрация озона на станциях городского типа оказалась на 6 мкг/м³ меньше предыдущего года и составила 32 мкг/м³. На станциях транспортного типа концентрация озона была на 40% меньше. Слабее обычного был весенний максимум ПКО. Из-за относительно холодной с осадками погоды в июне-июле вторичный летний максимум не сформировался. Осредненные по данным АСКЗА максимальные суточные концентрации приземного озона оказались меньше, чем в 2022 г. Недостаток летнего тепла частично компенсировало длительное «бабье лето» в сентябре. В последней декаде сентября с переходом на октябрь наблюдались нехарактерные для сезона «повышенные» относительно нормы ПКО. Средняя суточная концентрация озона, осредненная по данным АСКЗА транспортного типа, превышала принятую в РФ норматив для ПДК_{сс} на 12% (44 дня), на АСКЗА городского типа – на 51% (186 дней). Это меньше показателей 2022 г.

Две станции – ОПТЭК-N и Троицк – относятся к районам, в которых наименьшие концентрации озона меньше ПДК_{сс}. Так как ст. ОПТЭК-N расположена вблизи магистрали, то годовой ход озона такой же, как на транспортных станциях Москвы. А в Троицке не имеется значительных антропогенных выбросов озonoобразующих соединений. Об этом можно сказать не только по низким ПКО, но и по характеру годового хода, который типичен для фоновых условий.

2.3. Максимальные концентрации

Максимальные концентрации озона в приземном слое воздуха, наблюдавшиеся в 2023 г. на всех станциях, представлены на рис. 6. Видно, что только на четырех из 16 станций зафиксированы значения ПКО, превышающие максимальные разовые ПДК (ПДК_{мр}). Это два пункта измерений в Санкт-Петербурге (ОПТЭК-РР и ОПТЭК-Р), РУДН в Москве и Вятские Поляны. В 2022 г. таких станций было шесть [16]. Помимо перечисленных здесь, превышение было зарегистрировано на ТОР, БЭЖе и в Боярске. Следовательно, интенсивность генерации озона в 2023 г. была меньше, чем в 2022 г.

Как происходила генерация и с какой частотой фиксировались превышения ПДК_{мр} показано на рис. 7. Согласно рисунку, в Санкт-Петербурге максимальные концентрации озона наблюдались в летнее время и, скорее всего, возникали за счет фотохимической генерации из выбросов автотранспорта

на территории города в период прихода волн тепла. В Вятских Полянах максимум фиксировался весной и, по-видимому, имел природное происхождение. Несколько максимумов на ст. РУДН своим появлением обязаны «бабьему» лету в Московском регионе.

2.4. Мезомасштабные различия в распределении ПКО

В трех регионах наблюдения (Москва, Санкт-Петербург, Томская область) измерения озона в 2023 г. проводились на нескольких станциях. Поскольку в период измерений станции находились в сходных погодных условиях, интересно рассмотреть, насколько различаются концентрации озона на мезомасштабном уровне.

Если обратиться к рис. 8 (цв. вкладка), на котором приведены среднесуточные концентрации озона в Санкт-Петербурге и Томской области, то видно, что в обоих регионах на всех станциях погодные циклы довольно синхронны, отличаются только амплитуды колебаний концентраций. Насколько велики эти различия, можно судить по данным табл. 2. Она показывает, что в Москве различия в концентрациях между городскими и примагистральными станциями в среднем составляли 12,9 мкг/м³; максимальные в течение года достигали 39,2 мкг/м³. Между средними значениями по городу и ст. РУДН разница оказалась небольшой (1,9 мкг/м³), хотя максимальная была весьма значительной (30,4 мкг/м³). Заметно большие расхождения фиксировались между

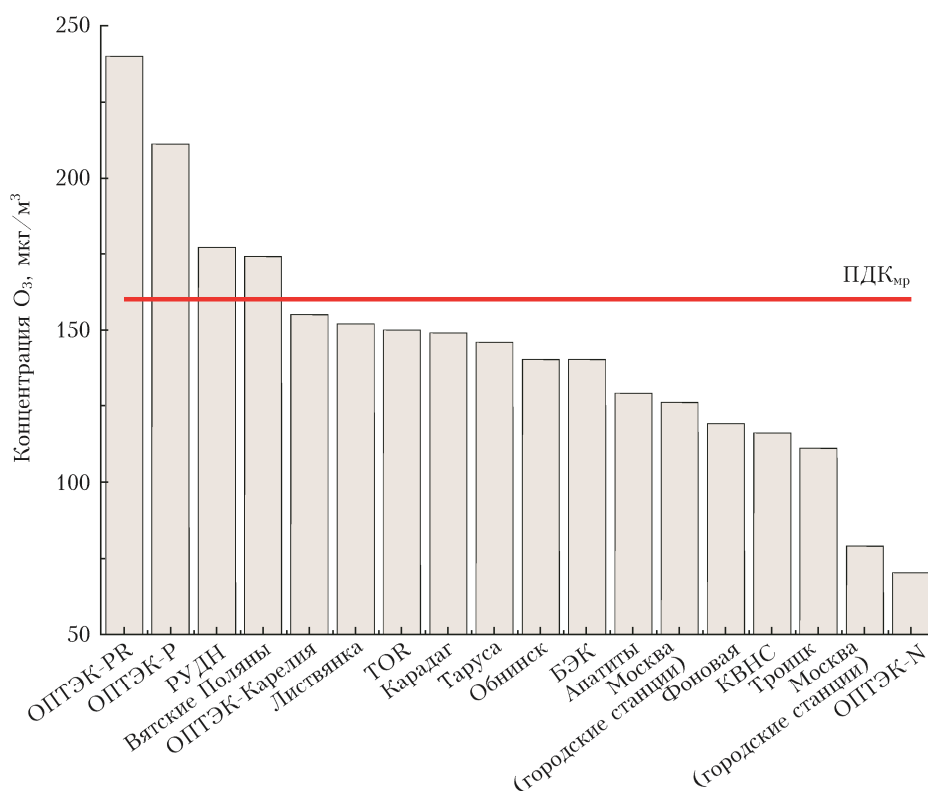


Рис. 6. Максимальные разовые приземные концентрации озона в 2023 г.

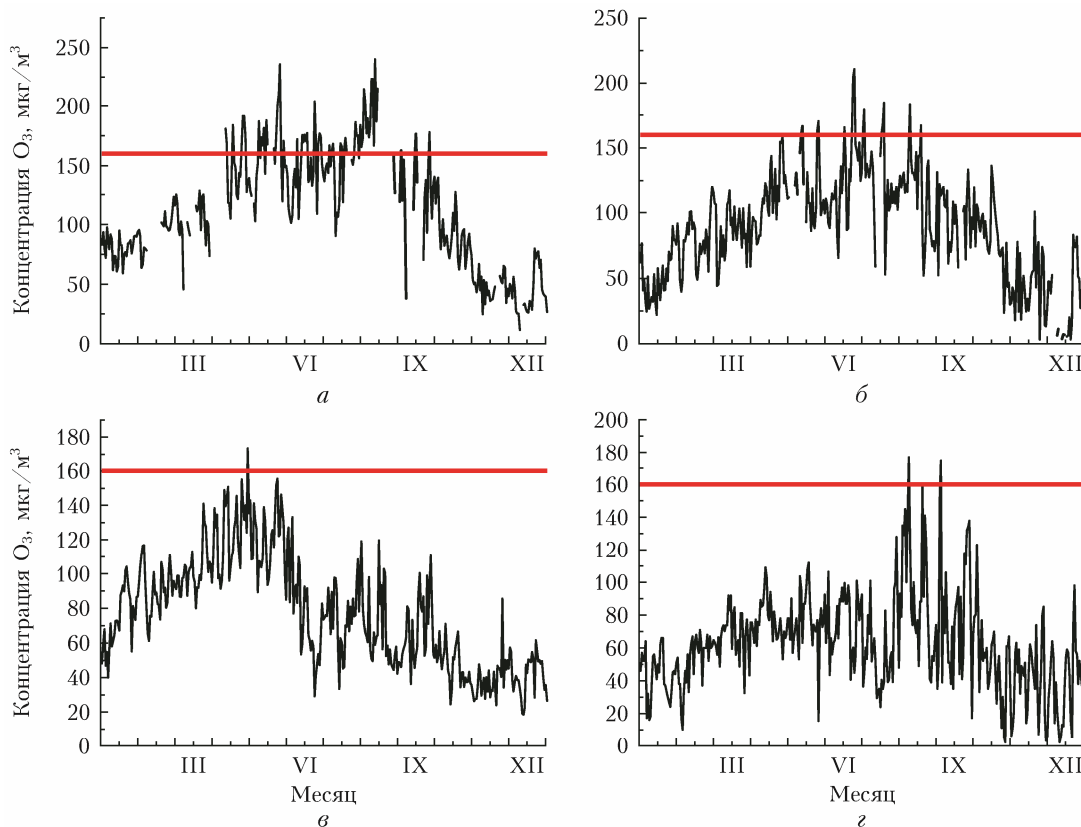


Рис. 7. Годовой ход максимальных за день ПКО: а – ОПТЭК-PR; б – ОПТЭК-Р; в – Вятские поляны; г – РУДН

пунктами РУДН и Троицком, которые составляли 18,6 в среднем и 68,6 мкг/м³ в максимуме. Последнее обусловлено близким (около 150 м) расположением ст. Троицк к Калужскому шоссе с интенсивным движением, в то время как на ст. РУДН отбор проб ведется во внутреннем дворе университета.

Таблица 2

Межстанционные различия в концентрации озона в Москве, Санкт-Петербурге и Томской области

Станции	Концентрация озона, мкг/м ³	
	средняя	максимальная
Москва (городские – транспортные)	12,9	39,2
Москва (городские станции) – РУДН	1,9	30,4
РУДН – Троицк	18,6	68,6
ОПТЭК-PR – ОПТЭК-N	56,4	126,6
ОПТЭК-Р – ОПТЭК-N	33,9	116,4
ОПТЭК-PR – ОПТЭК-Р	22,5	84,6
TOR – Фоновая	5,5	38,8
БЭК – Фоновая	5,6	36,8
БЭК – TOR	0,2	26,9

Еще большие различия в содержании озона фиксировались на территории Санкт-Петербурга в 2023 г. Средняя разница концентраций между двумя станциями изменялась от 22,5 до 56,4 мкг/м³, а максимальная – от 84,6 до 126,6 мкг/м³.

В Томской области различия в ПКО между разнесенными станциями (52 и 56 км) в среднем были 5,5 и 5,6 мкг/м³, близко расположенными – 0,2 мкг/м³. При этом различия в отдельные дни были соизмеримы с московскими – от 23,9 до 38,8 мкг/м³. Такие мезомасштабные различия в концентрации озона очевидно связаны с наличием в Москве источников газов – предшественников озона. На территории городов такими в основном являются выбросы автотранспорта и промышленных объектов [23].

3. Вертикальное распределение озона в тропосфере

Вертикальное распределение озона в тропосфере измерялось с помощью самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик», современный состав оборудования которого представлен в [24]. В течение всего рассматриваемого периода выполнялись ежемесячные полеты над южными районами Западной Сибири. В связи с тем, что носитель оборудования Ту-134 отлетал дважды свой календарный срок эксплуатации и периодически останавливается на проверку для продления, часть полетов выполнялась на самолете Як-40.

Данные измерений в 2023 г. представлены на рис. 9 (цв. вкладка). Профили в период нарастания концентрации озона в тропосфере приведены на рис. 9, а, его вертикальное распределение в период

уменьшения – на рис. 9, б. Из рис. 9, а видно, что зимой и в начале весны концентрация озона в нижнем слое была небольшой (25–40 млрд⁻¹) и увеличивалась до 60 млрд⁻¹ в средней и верхней тропосфере. Такой вертикальный профиль говорит о том, что процессы обмена со стратосферой были в этот период значительными, а генерация его в тропосфере, наоборот, не очень интенсивной. Во второй половине года, в условиях умеренного обмена воздухом между тропосферой и стратосферой (см. рис. 9, б), фотохимическое образование озона уменьшилось. Концентрация в нижних слоях атмосферы снизилась до 15–25 млрд⁻¹.

Таким образом, если сопоставлять представленные на рис. 9 профили вертикального распределения озона с ранее полученными для этого же региона [13–16], то можно прийти к выводу, что концентрации озона в 2023 г. были несколько ниже, чем в предыдущие годы. По-видимому, находит отражение многолетняя цикличность атмосферных процессов.

4. Соответствие концентрации озона в России гигиеническим нормативам

Напомним, что федеральными санитарными правилами [17] в России установлены следующие нормативы:

– концентрация, обеспечивающая допустимые (приемлемые) уровни риска при хроническом (не менее одного года) воздействии, ПДК_{ст} = 30 мкг/м³;

– концентрация, обеспечивающая допустимые (приемлемые) уровни риска при воздействии не менее 24 ч, ПДК_{сс}. Для озона это максимальная, средняя за 8 ч концентрация в данные сутки – 100 мкг/м³;

– концентрация, предотвращающая раздражающее действие, рефлекторные реакции, запахи при воздействии до 20–30 мин, ПДК_{мп} = 160 мкг/м³.

В табл. 3 приведены станции мониторинга озона, где в 2023 г. отмечалось превышение ПДК. Видно, что превышение ПДК_{мп} = 160 мкг/м³ в 2023 г. фиксировалась на четырех станциях. В 2021 г. их было пять, в 2022 – шесть. Наибольшее количество превышений – 59 и 14 – в Санкт-Петербурге; 11 раз оно наблюдалось в Москве (ст. РУДН) и на ст. Вятские Поляны.

Несмотря на то что ПДК_{сс}, согласно [17], увеличилась в РФ в 3,33 раза, данные табл. 3 показывают, что на территории России в 2023 г. отмечалось регулярное превышение ПДК_{сс} почти во всех пунктах. Исключение составляют примагистральные станции в Москве и Троицке. Наиболее часто превышение ПДК_{сс} фиксировалось в Вятских Полянах, Листвянке, Карадаге, на городских станциях Москвы и на двух станциях в Санкт-Петербурге.

Еще один новый параметр в нормативе – ПДК_{ст} [17]. Данные табл. 3 показывают его превышение почти по всей территории России. Исключение составляют примагистральные станции в Москве и Троицке.

Таким образом, согласно результатам исследования для большинства регионов России требуется проведение природоохранных мероприятий по снижению уровня концентрации тропосферного озона.

Таблица 3
Превышение предельно допустимых концентраций озона в России в 2023 г.

Станция	Случаи превышения ПДК _{мп} , кол-во	Случаи превышения ПДК _{сс} , кол-во	Превышение ПДК _{ст} , мкг/м ³	Количество измерений в 2023 г.
Апатиты		5	1,6	354
Вятские поляны	11	69	1,7	365
Листвянка		56	2,0	349
КВНС		2	2,3	340
Карадаг		45	2,1	365
Москва (городские станции)		44	1,1	365
Москва (транспортные станции)			0,6	365
Обнинск		7	1,2	362
ОПТЭК-N			0,6	281
ОПТЭК-Р	14	92	1,8	349
ОПТЭК-PR	59	138	2,5	299
ОПТЭК-Карелия		18	1,9	218
TOR		8	1,5	349
БЭК		7	1,5	359
Фоновая		1	1,3	360
РУДН	11	11	1,0	362
Троицк			0,4	361
Таруса		12	1,2	365

В табл. 4 представлены результаты сравнения двух нормативов: предыдущего [25] и вновь введенного.

Таблица 4
Повторяемость (%) случаев превышения ПДК_{сс} по предыдущему и действующему нормативам

Станция	Норматив	
	ГН 2.1.6.3492-17	ГН 1.2.3685-21
Апатиты	86	2
Вятские поляны	98	19
Листвянка	92	16
КВНС	100	1
Карадаг	97	12
Москва (городские станции)	52	12
Москва (транспортные станции)	12	
Обнинск	67	2
ОПТЭК-N	10	
ОПТЭК-Р	73	26
ОПТЭК-PR	89	47
ОПТЭК-Карелия	91	8
TOR	78	2
БЭК	80	2
Фоновая	66	1
РУДН	47	3
Троицк	4	
Таруса	70	3

Данные табл. 4 показывают, что введение менее жесткого норматива для ПДК_{сс} существенно улучшило оценку качества воздуха по показателю «загрязнение воздуха озоном»: в среднем в 5–10 раз (например, Листвянка, Вятские Поляны, Карадаг), в некоторых регионах – в десятки раз (Кольский полуостров, Карелия, Калужская и Томская области). Но даже с новым показателем на территории России почти повсеместно наблюдается превышение ПДК_{сс}.

Заключение

Мониторинг концентрации озона в 2023 г. показал, что на территории РФ она оказалась несколько ниже, чем в 2022 г. Это касается как приземного слоя, так и свободной тропосферы.

Почти во всех регионах, где проводились измерения, зафиксировано превышение всех видов ПДК: максимальной разовой, среднесуточной и среднегодовой. В связи с сложившейся ситуацией необходимо широко информировать население о результатах мониторинга и возможных последствиях превышения гигиенического норматива, а также разработать природоохранные мероприятия по снижению уровня концентрации озона в приземном слое воздуха.

В качестве положительного факта следует отметить начало публикаций Росгидрометом данных о приземной концентрации озона в ежегодниках состояния загрязнения воздуха в городах на территории РФ [12].

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственных заданий РУДН, ИОА СО РАН, АО «ОПТЭК», ПГИ РАН, ИФА РАН (1021042900488-7-1.5.10), ИОФ РАН, ГМЦ, КНС – ПЗ РАН филиал ФИЦ ИнБЮМ (№ 124030100098-0), ГПБУ «Мосэкомониторинг», ЛИИ СО РАН (№ 0279-2021-0014), НПО «Тайфун» (тема 2.3. раздел 6 Плана НИУ Росгидромета).

Список литературы

1. Лукин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. Физическая химия озона. М.: МГУ, 1998. 480 с.
2. Разумовский С.В., Зайков Г.Е. Озон и его реакции с органическими соединениями (кинетика и механика). М.: Наука, 1974. 322 с.
3. Вредные химические вещества. Неорганические соединения V–VIII групп / под ред. В.А. Филова. Л.: Химия, 1989. 592 с.
4. 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. DOI: 10.1038/nature15371.
5. Air pollution takes a big bite out of Asia's grain crops // *Nature*. 2022. V. 601, N 7894. P. 487. DOI: 10.1038/d41586-022-00117-3.
6. Rowlinson M.J., Rap A., Hamilton D.S., Pope R.J., Hantson S., Arnold S.R., Kaplan J.O., Arneeth 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. DOI: 10.5194/acp-20-10937-2020.
7. 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.
 8. Белан Б.Д. Озон в тропосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 488 с.
 9. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe. European Parliament, 2008. 27 p.
 10. Soulie A., Granier C., Darras S., Zilbermann N., Doumbia T., Guevara M., Jalkanen J.-P., Keita S., Lioussse C., Crippa M., Guizzardi D., Hoesly R., Smith S. Global anthropogenic emissions (CAM5-GLOB-ANT) for the Copernicus Atmosphere Monitoring Service simulations of air quality forecasts and reanalyses // *Earth Syst. Sci. Data Discuss.* 2023. P. 1–45. DOI: 10.5194/essd-2023-306.
 11. Андреев В.В., Баженов О.Е., Белан Б.Д., Варгин П.Н., Груздев А.Н., Еланский Н.Ф., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Куликов М.Ю., Невзоров А.В., Оболкин В.А., Постыляков О.В., Розанов Е.В., Скороход А.И., Соломатникова А.А., Степанов Е.В., Фейгин А.М., Ходжер Т.В. Российские исследования атмосферного озона и его предшественников в 2019–2022 гг. // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2023. Т. 59, № 7. С. 1034–1060. DOI: 10.31857/S0002351523070027
 12. Ежегодник состояния загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2022 г. М.: ФГБУ «ГГО», 2023. 255 с.
 13. 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., Сенюк И.А., Степанов Е.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В., Фофанов И.В., Челибанов И.В., Челибанов В.П., Широков В.В. Приземная концентрация озона на территории России в первом полугодии 2020 г. // *Оптика атмосф. и океана*. 2020. Т. 33, № 9. С. 710–721. DOI: 10.15372/AOO20200908; 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., Kotel'nikov S.N., Kuznetsova I.N., Lapchenko V.A., Lezina E.A., Postilyakov O.V., Saokin 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.
 14. 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., Сенюк 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 атмосф. и океана*. 2021. Т. 34, № 4. С. 292–301. DOI: 10.15372/AOO20210407; 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., Kotel'nikov S.N., Kuznetsova I.N., Lapchenko V.A., Lezina E.A., Postilyakov O.V., Saokin D.E., Senik I.A., Stepanov E.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V., Chelibanovi I.V., Chelibanov V.P., Shirokov 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.
15. 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. DOI: 10.15372/АОО20220706; 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., Kotel'nikov 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.
 16. 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., Иванов Р.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Коновальцева Л.В., Коренский М.Ю., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Оболкин В.А., Постыляков О.В., Потемкин В.Л., Савкин Д.Е., Семутникова Е.Г., 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 2022 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2023. Т. 36, № 8. С. 642–655. DOI: 10.15372/АОО20230804; 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., Ivanov R.V., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Konovaltseva L.V., Korenskiy M.Yu., Kotel'nikov S.N., Kuznetsova I.N., Lapchenko V.A., Lezina E.A., Obolkin V.A., Postilyakov O.V., Potemkin V.L., Savkin D.E., Semutnikova E.G., 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 in Russia in 2022 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2023, V. 36, N 6. P. 741–757.
 17. 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.
 18. WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization, 2021. 275 p.
 19. Сеник И.А., Еланский Н.Ф., Беликов И.Б., Лисицкая 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.
 20. 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, N 1. P. S39–S48.
 21. Еланский Н.Ф. О механизме воздействия струйного течения на озоновый слой // *Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана.* 1975. Т. 11, № 9. С. 916–925.
 22. Мосэкомониторинг. <https://mosecom.mos.ru/vozdux/>
 23. Белан Б.Д. Перевод автотранспорта на газ – возможные проблемы // *Вестн. РАН.* 2015. Т. 85, № 3. С. 233–239.
 24. 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., Mikhail'chishin A.V., Mosekin I.A., Nasonov S.V., Nédélec P., Okhlopko O.V., O'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. DOI: 10.5194/amt-20210437.
 25. 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 г. (с изменениями на 31 мая 2018 г.).

V.V. Andreev, M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, S.B. Belan, V.A. Gordyushkin, D.K. Davydov, V.I. Demin, N.V. Dudorova, N.F. Elansky, 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, O.O. Marchenko, 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. Shiroto V.V., Yu.A. Shtabkin, K.A. Shukurov. **Tropospheric ozone concentration in Russia in 2023.**

The relevance of studying the dynamics of ozone concentration is due to the fact that at high concentrations it is a potent poison and a powerful oxidizer that extremely negatively impacts both biological objects and the environment. Based on the monitoring data, the paper examines the distribution of tropospheric ozone in Russia in 2023 in the surface air layer, as well as its vertical distribution based on the results of aircraft sounding. It is shown that the maximum allowable daily average concentrations established by the domestic hygienic standard, maximum single, daily average, and annual average, were exceeded at all measurement points. The current situation necessitates widespread public awareness of the results of monitoring and the development of environmental measures to reduce the concentration of ozone and its precursors in the surface air layer.

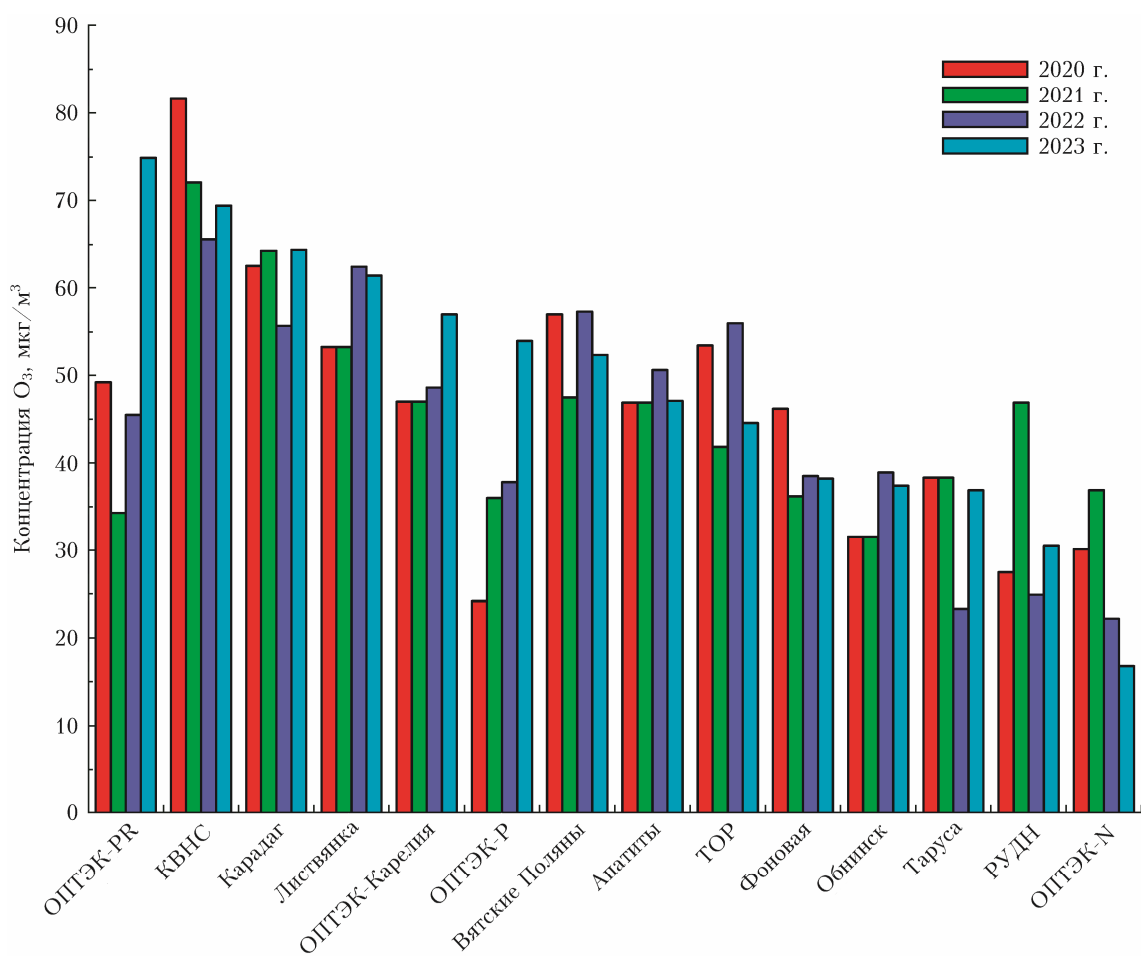


Рис. 2. Среднегодовые концентрации озона в 2020–2023 гг.

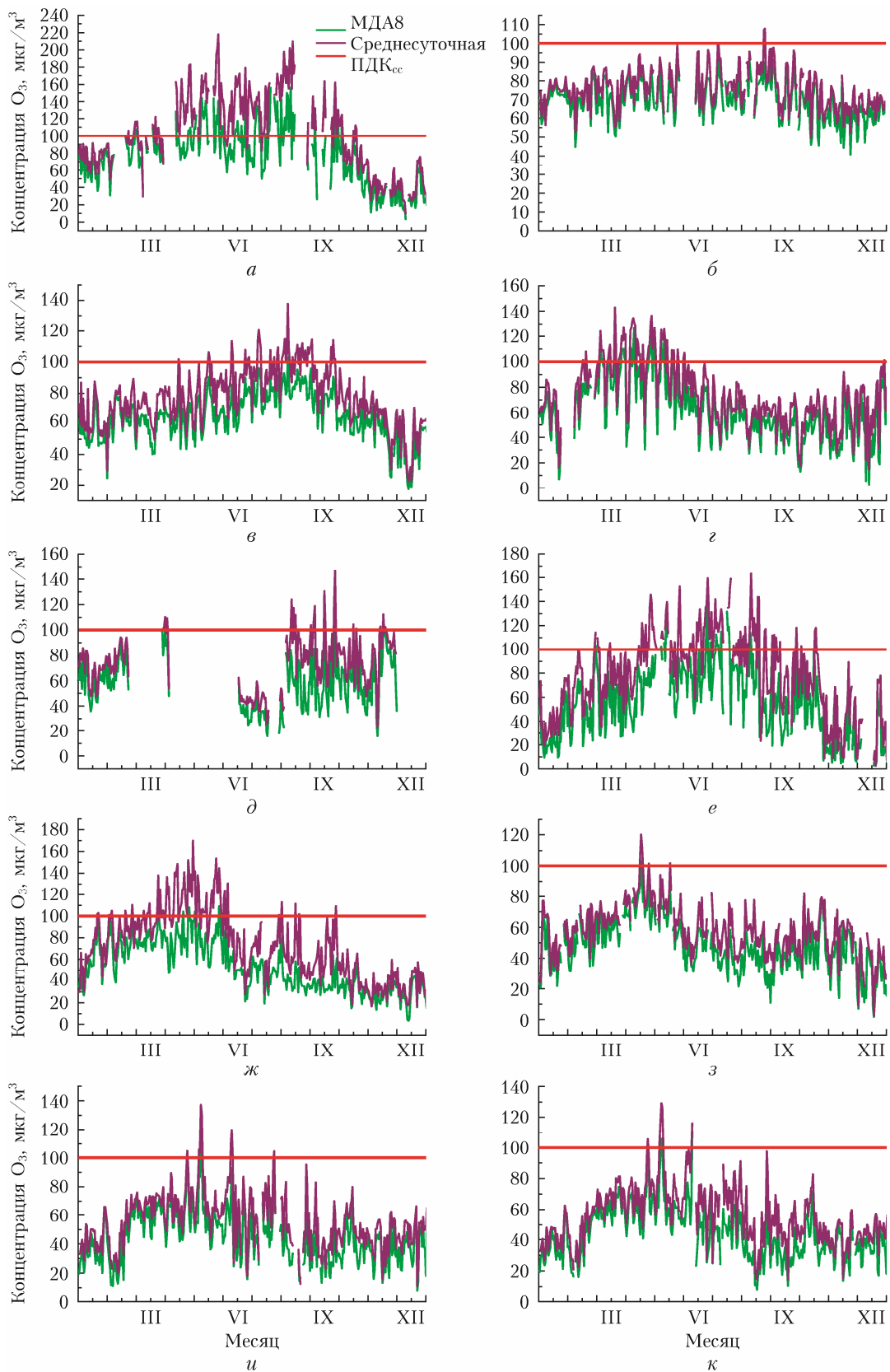
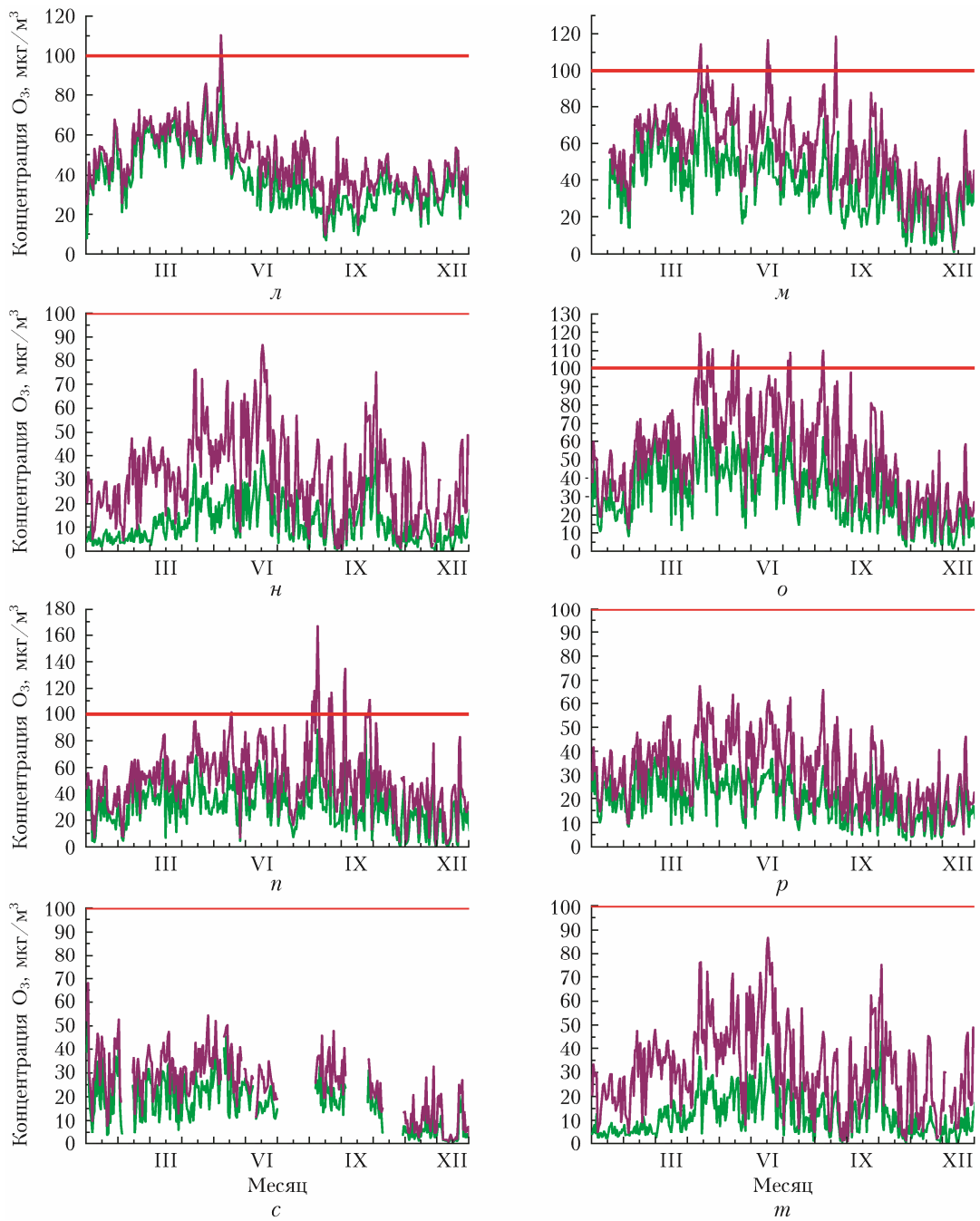


Рис. 3. Годовой ход среднесуточных и максимальных дневных восьмичасовых средних концентраций озона: *a* – ОПТЭК-PR; *б* – КВНС; *в* – Карадаг; *г* – Листвянка; *д* – ОПТЭК-Карелия; *е* – ОПТЭК-Р; *ж* – Вятские поляны; *з* – Апатиты; *и* – ТОР; *к* – БЭК; *л* – Фоновая; *м* – Обнинск; *н* – Таруса; *о* – Москва (городские станции); *п* – Москва (транспортные станции); *с* – ОПТЭК-Н; *т* – Троицк



Окончание рис. 3

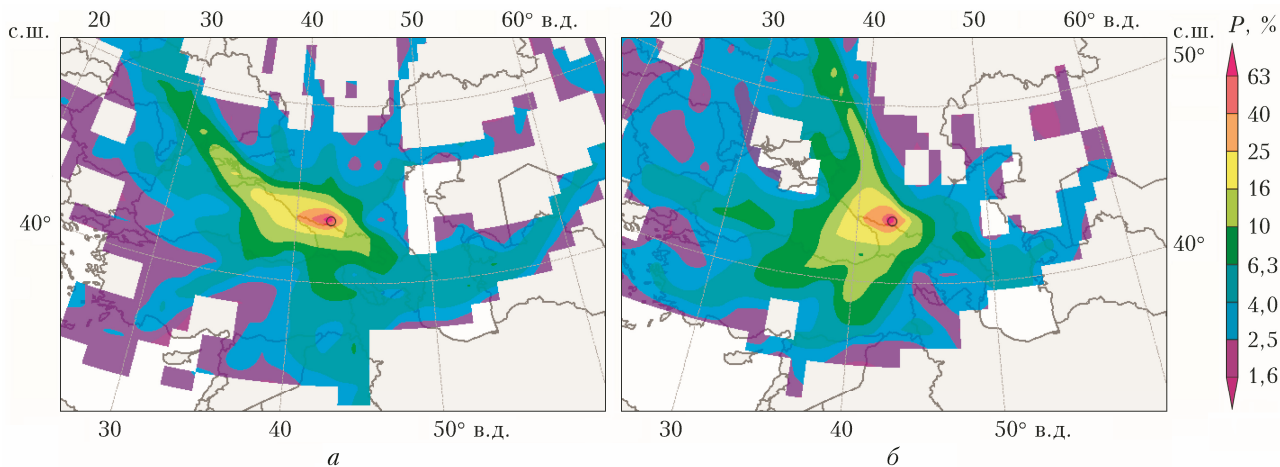


Рис. 4. Вероятность прохождения элементарных воздушных масс, связанных с 10% самых низких (а) и 10% самых высоких (б) аномалий концентрации приземного озона на KBHC в 2023 г., над различными территориями

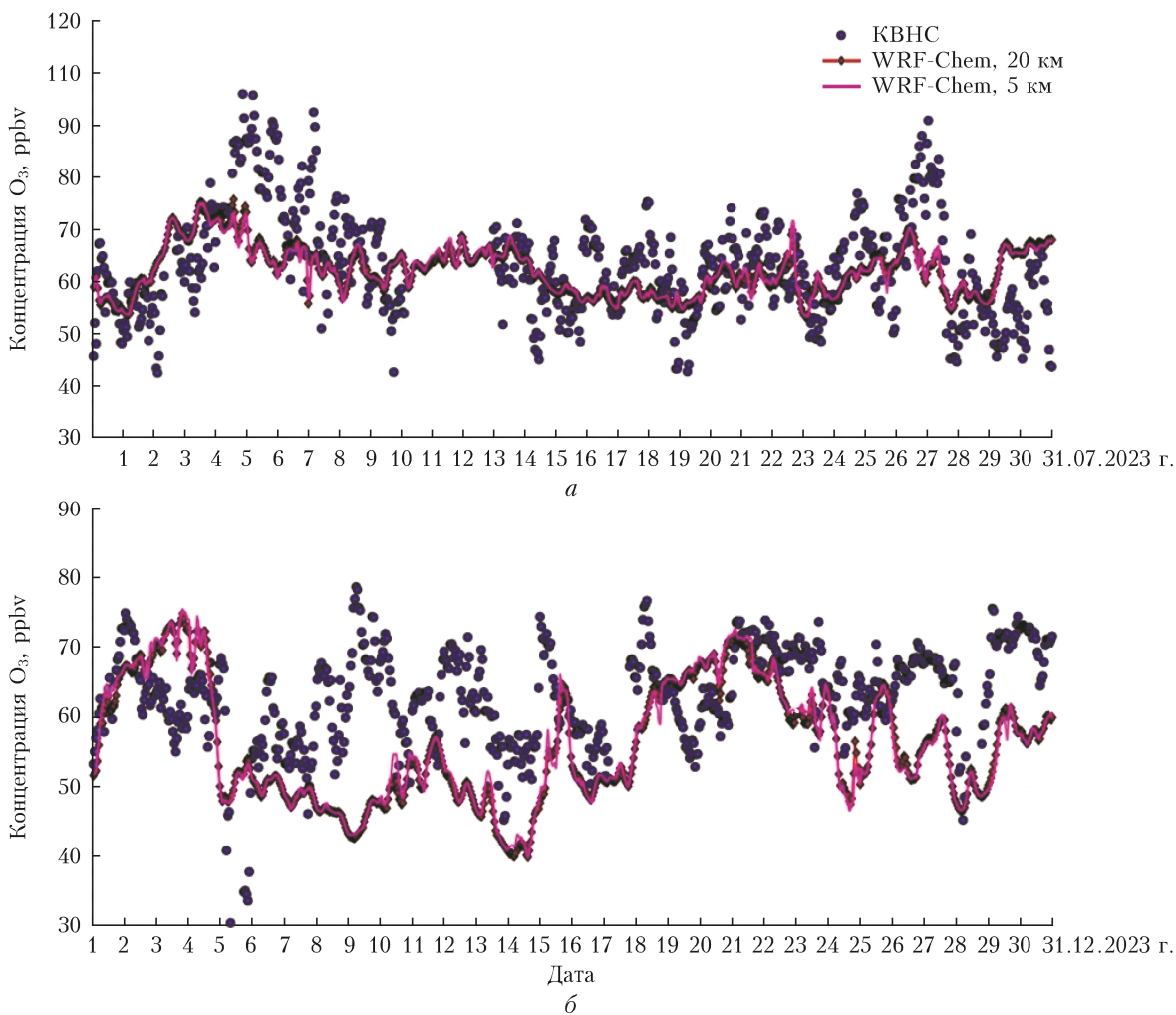


Рис. 5. Среднечасовые концентрации озона в приземном воздухе на KBHC и численные расчеты по модели WRF-Chem для июля (а) и декабря (б) 2023 г.

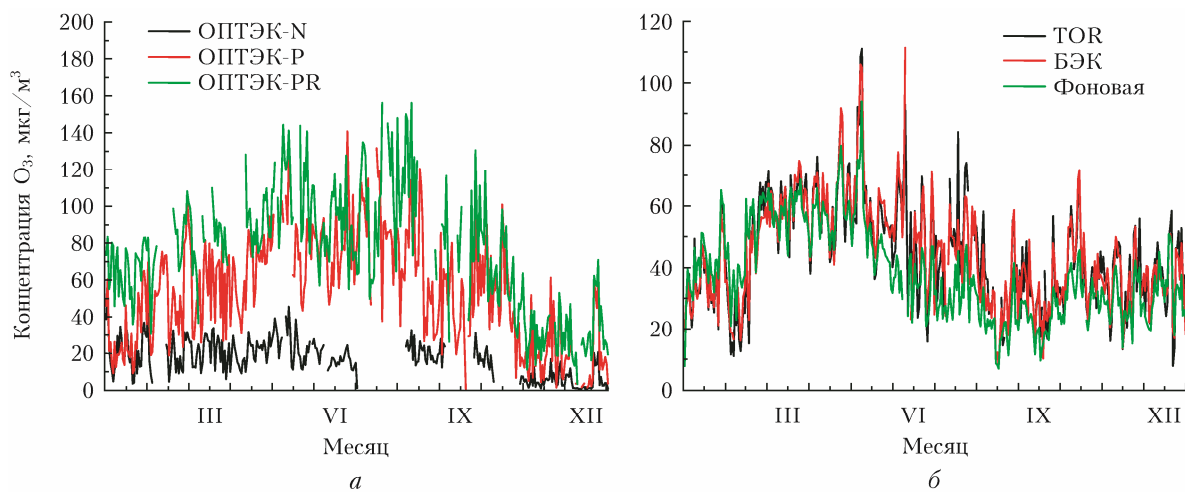


Рис. 8. Среднесуточные ПКО на станциях Санкт-Петербурга (а) и Томской области (б)

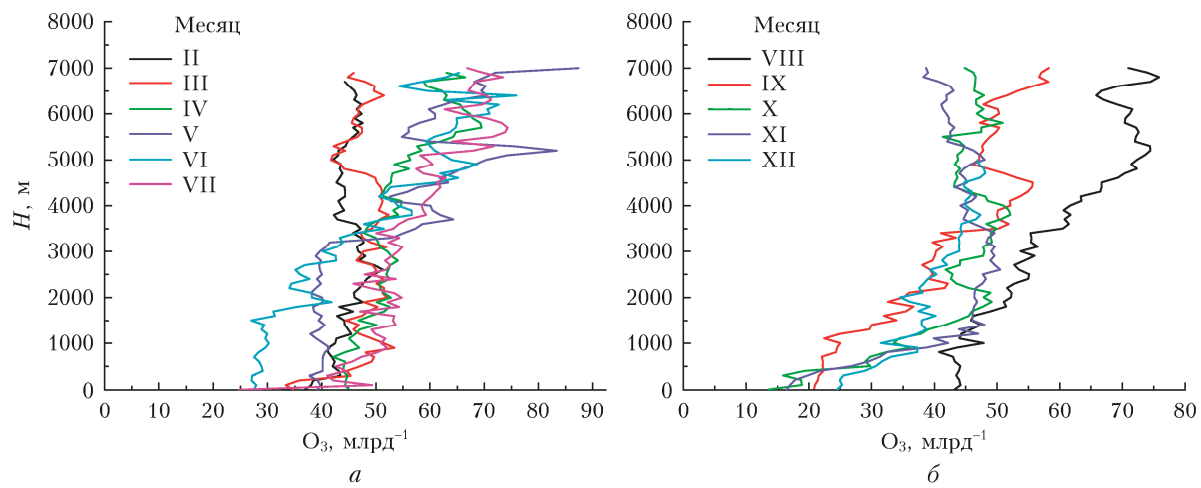


Рис. 9. Вертикальное распределение озона над югом Западной Сибири в феврале – июле (а) и августе – декабре 2023 г. (б)