

Концентрация тропосферного озона на территории России в 2024 г.

В.В. Андреев¹, П.Н. Антохин², М.Ю. Аршинов², В.Г. Аршинова²,
Б.Д. Белан², С.Б. Белан², В.А. Гордюшкин³, Д.К. Давыдов², В.И. Демин⁴,
Н.В. Дудорова², Н.Ф. Еланский⁵, Г.С. Жамсуева⁶, Ж.А. Жеурова²,
А.С. Заяханов⁶, Р.В. Иванов⁷, Г.А. Ивлеву², А.В. Козлов², С.Н. Котельников⁷,
И.Н. Кузнецова⁸, В.А. Лапченко⁹, Е.А. Лезина¹⁰, О.О. Марченко²,
В.А. Оболкин¹¹, О.В. Постыляков⁵, В.Л. Потемкин¹¹, А.М. Пухович⁷,
Д.Е. Савкин², Е.Г. Семутникова¹⁰, И.А. Сеник⁵, Т.К. Складнева²,
Е.В. Степанов⁷, Г.Н. Толмачев², А.В. Фофонов², Е.Ю. Хаджийская⁷,
Т.В. Ходжер¹¹, И.В. Челибанов³, В.П. Челибанов³, В.В. Широков¹²,
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 физического материаловедения СО РАН; 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

⁷Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН; 111933, г. Москва, ул. Вавилова, 38

⁸Гидрометцентр России; 123242, г. Москва, Большой Предтеченский пер., 11–13

⁹Карадагская 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

¹⁰Мосэкомониторинг; 119019, г. Москва, ул. Новый Арбат, 11, стр. 1

¹¹Лимнологический институт СО РАН; 664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3

¹²НПО «Тайфун»; 249038, Калужская область, г. Обнинск, ул. Победы, 4

Поступила в редакцию 19.05.2025;
после доработки 16.06.2025;
принята к печати 04.07.2025

Озон в приземном слое воздуха в высоких концентрациях является мощным окислителем, негативно воздействующим на биологические объекты и элементы окружающей среды. Поэтому весьма актуально исследование динамики его концентрации во всех регионах планеты. В настоящей работе на основе данных годового мониторинга рассматриваются концентрации озона на территории России в 2024 г., мезомасштабные различия его содержания в отдельных регионах, вертикальное распределение по данным самолетного зондирования, проводится сопоставление с гигиеническими нормативами. Показано, что среднегодовое содержание озона в приземном слое воздуха на территории России изменялось от 17 до 92 мкг/м³, максимальные за час концентрации – от 90 до 222 мкг/м³. В фоновых условиях в годовом ходе максимум концентрации наблюдается, как правило, весной, в городских – летом. На фоновых станциях вторичный максимум концентрации озона стал заметным в начале осени. Мезомасштабные различия в концентрациях достигают 50–70 мкг/м³ и существенно меняются в течение суток и года. В большинстве пунктов измерений превышались установленные отечественным гигиеническим нормативом предельно допустимые максимальные разовые, среднесуточные и среднегодовые концентрации. Сложившаяся ситуация говорит о необходимости широко информировать население о результатах мониторинга и требует разработки природоохранных мероприятий по снижению уровня концентрации озона и его прекурсоров 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); Павел Николаевич Антохин (arpn@iao.ru); Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Виктория Геннадьевна Аршинова (arvi@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@pgia.ru); Нина Викторовна Дудорова (ninosh@mail.ru);

Введение

Исследование тропосферного озона имеет важное значение по целому ряду причин. В силу своих особых физико-химических свойств он оказывает негативное воздействие на биологические объекты и элементы окружающей среды [1–3]. В первую очередь влияет на заболеваемость и смертность населения. Согласно [4] ежегодно в мире от повышенных концентраций озона и мелкодисперсного аэрозоля преждевременно умирают 3,3 млн человек. Высокие концентрации озона приводят к уменьшению урожайности, а иногда и гибели растений [5, 6], а также уменьшают способность растений поглощать углекислый газ, что может привести к усилению радиационного форсинга планеты [6, 7]. Будучи мощнейшим активным газом, озон разрушает резину, каучук, окисляет многие металлы, даже платиновой группы [8–11]. Озон является четвертым по значимости парниковым газом, и его вклад в радиационный эффект, обусловленный поглощением солнечного излучения, составляет 20% от углекислого газа [12]. Следует также отметить, что вместе с озоном в ходе фотохимических процессов образуются и другие вредные примеси, например формальдегид [13], аэрозольные частицы, также содержащие токсичные соединения [14, 15]. Озон можно рассматривать как индикатор прохождения фотохимических процессов в воздухе. Важно также, что при генерации тропосферного озона образуется гидроксил, который существенно повышает окислительный потенциал атмосферы [16].

Выполненный в работах [17, 18] анализ свидетельствует о том, что современная приземная концентрация озона (ПКО) возросла по сравнению с доиндустриальным периодом (1890 г.) в пять раз. Было установлено, что генерация тропосферного озона растет с увеличением температуры воздуха [19, 20]. Это происходит по двум причинам: возрастает скорость фотохимических реакций и увеличивается выброс органических газов-предшественников растительностью. Учитывая, что глобальное потепление продолжается и уже превысило порог в 1,5 °C [21], возникает вопрос: как будет изменяться ПКО в будущем? Численное моделирование, выполненное с целью оценки будущих тенденций изменения озона, также не дает однозначного

ответа, так как в зависимости от закладываемого сценария выбросов возможен как рост его концентрации, так и уменьшение [22, 23].

Озон — вторичный загрязнитель, поскольку не выбрасывается непосредственно в воздух никакими источниками [13]. В естественных условиях он образуется в верхних слоях атмосферы Земли (~ 50 км), а концентрация в нижних слоях тропосферы является результатом баланса между переносом сверху из стратосферы и фотохимической генерацией в тропосфере, разрушением и осаждением на поверхности Земли. Следует различать механизмы генерации в тропосфере в фоновых и городских условиях. В фоновых районах началом цепочки реакций является фотолиз уже имеющегося или поступившего из стратосферы озона, в загрязненных его фотохимическое образование — это результат реакций между оксидами азота (NO_x) и летучими органическими соединениями при наличии солнечного света.

Отрицательные последствия от увеличения концентрации тропосферного озона как для человека, так и для окружающей среды (особенно после смога в Лос-Анджелесе) вызвали повышенное внимание к изменению его содержания в развитых странах. Был организован постоянный мониторинг ПКО. Так, по данным [24] в Европе уже в 2003 г. насчитывалось более 10 тыс. станций мониторинга озона и его предшественников. Очень важно, что информация доводится до населения и используется для принятия решений органами управления. В США и Великобритании уже удалось добиться снижения концентрации озона в воздухе [25–27]. Имеется большой прогресс в этом направлении в Китае [28, 29]. В Азии с 2012 г. наблюдается снижение выбросов газов — предшественников образования озона, резко выросших в нулевые годы [6].

Как представляется авторам обзора, в России контролю концентрации озона в приземном слое воздуха и организации мероприятий по уменьшению его содержания не уделяется должного внимания [30]. Только в последние несколько лет Росгидрометом начаты измерения в ряде крупных промышленных городов, и впервые часть данных опубликована в [31]. Согласно этому ежегоднику мониторинг осуществлялся на 53 станциях в 17 городах. Однако созданная сеть постов Росгидромета

Николай Филиппович Еланский (n.f.elansky@mail.ru); Галина Санжиевна Жамсуева (galinazham@gmail.com); Жанна Анатольевна Жеурова (jja@iao.ru); Александр Савельевич Заяханов (lmza@mail.ru); Роман Владимирович Иванов (leon076@yandex.ru); Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru); Артем Владимирович Козлов (artem@iao.ru); Сергей Николаевич Котельников (skotelnikov@mail.ru); Ирина Николаевна Кузнецова (labmuza@mail.ru); Владимир Александрович Лапченко (ozon.karadag@gmail.com); Елена Александровна Лезина (LezinaEA@eco.mos.ru); Олеся Олеговна Марченко (marchenko@nnc.kz); Владимир Аркадьевич Оболкин (obolkin@lin.irk.ru); Олег Вадимович Постыляков (oleg.postylyakov@gmail.com); Владимир Львович Потемкин (klimat@lin.irk.ru); Алексей Михайлович Пу-

хович (poohpro12@gmail.com); Денис Евгеньевич Савкин (sde@iao.ru); Евгения Геннадьевна Семутникова (egsemutnikova@mail.ru); Ирина Анатольевна Сеник (senik_ia@list.ru); Татьяна Константиновна Складнева (tatyana@iao.ru); Евгений Валерьевич Степанов (EugeneStepanov@yandex.ru); Геннадий Николаевич Толмачев (tgn@ipc.tsc.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru); Елизавета Юрьевна Хаджийская (lizahajiiskaya@yandex.ru); Тамара Викторовна Ходжер (khodzher@lin.irk.ru); Иван Владимирович Челибанов (ichelibanov@gmail.com); Владимир Петрович Челибанов (chelibanov@gmail.com); Вадим Викторович Широтов (shiroto@rpatyphoon.ru); Юрий Александрович Штабкин (yuryshtabkin@gmail.com); Карим Абдурахимович Шукуров (karim.shukurov@ifaran.ru).

пока не позволяет ответить на самые основные вопросы. В каких регионах России люди и растения подвергаются наибольшему воздействию озона? Как озон изменяется в регионах с жестким контролем выбросов? Как можно облегчить доступ к показателям озона, необходимым для количественной оценки его воздействия на климат, здоровье человека и продуктивность сельскохозяйственных культур/экосистем? В связи со всем вышесказанным на фоновых территориях РФ наблюдения за озоном начали осуществлять в инициативном порядке. Образовавшийся неформальный консорциум организаций публикует ежегодные обзоры, в которых представляется информация о содержании озона в тропосфере в некоторых регионах России [32–35].

Настоящая статья является продолжением серии обзоров. Цель — предоставление сведений о состоянии озона в 2024 г. в различных частях России, а также сравнительный анализ соответствия концентрации озона отечественным гигиеническим нормативам [36].

1. Сеть станций

Ученые, которые занимаются исследованием озона в атмосфере, уделяют пристальное внимание методам и оборудованию для его измерения. Детальные обзоры по этой тематике имеются в [17]. Поскольку в настоящей работе принимали участие группы ученых со всей России, то и применяемое

оборудование, как правило, приобретенное по собственной инициативе, различается на разных станциях.

Ранее в обзорах [32–35] приводилось описание станций и приборов на них. Вначале количество пунктов наблюдений росло. Информация о станциях, так же как и характеристики оборудования, находятся в разных статьях. Поэтому в табл. 1 приведены общие характеристики средств измерений озона на станциях, данные которых включены в настоящий обзор.

В 2024 г. список увеличился на одну станцию, расположенную в Бурятии. Данные измерений на перечисленных в табл. 1 станциях дополнены средними характеристиками сети Мосэкомониторинга для постов городского (гт) и транспортного типов (тт). Их список был приведен в одном из обзоров [32–35]. Таким образом, в настоящей работе представлены результаты мониторинга на 19 станциях, две из которых представляют средние характеристики по всей Москве и некоторым пригородам.

Из данных табл. 1 следует, что станции нашего консорциума расположены на территории 11 субъектов Российской Федерации. Для такой огромной территории, как Россия, этого количества явно недостаточно. По типу местонахождения станции можно разделить на городские (7 шт.) и фоновые (6 шт.). Две станции являются пригородными, одна высокогорная. Самой западной является ОПТЭК-PR,

Таблица 1

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

№	Станция (регион)	Координаты		Прибор	Диапазон (неопределенность)
		с. ш.	в. д.		
1	ОПТЭК-PR (Ленинградская область)	60°42'59"	30°03'24"	3.02П-А «ОПТЭК»	0–500 мкг/м ³ (± 2 мкг/м ³)
2	ОПТЭК-Р (Санкт-Петербург)	59°56'27"	30°15'14"	3.02П-А «ОПТЭК» Ф-105 «ОПТЭК»	0–500 мкг/м ³ (± 2 мкг/м ³) 0–10000 мкг/м ³ (± 5 мкг/м ³)
3	ОПТЭК-N (Санкт-Петербург)	59°55'23"	30°23'17"	3.02П-А «ОПТЭК»	0–500 мкг/м ³ (± 2 мкг/м ³)
4	Апатиты (Мурманская область)	67°34'14"	33°23'51"	DASIBI 1008 АН	0–500 млрд ⁻¹ (± 2 млрд ⁻¹) 0–1000 млрд ⁻¹ (± 1 млрд ⁻¹)
5	СФЭМ «Карадаг» (Республика Крым)	44°56'24"	35°14'12"	Horiba APOA – 370 3.02-П ОПТЭК	0–200 млрд ⁻¹ (± 1%) 0–500 мкг/м ³ (± 20%)
6	Обнинск (Калужская область)	55°05'48"	36°36'36"	Ф-105 «ОПТЭК»	0–10000 мкг/м ³ (± 5 мкг/м ³)
7	Таруса (Калужская область)	54°43'36"	37°10'40"	3.02П-А «ОПТЭК»	0–500 мкг/м ³ (± 2 мкг/м ³)
8	ИОФ РАН (Москва)	55°41'46"	37°34'03"	3.02П-А «ОПТЭК»	0–500 мкг/м ³ (± 2 мкг/м ³)
9	РУДН (Москва)	55°42'37"	37°36'78"	3.02 П-А «ОПТЭК»	0–500 мкг/м ³ (± 20%)
10	КВНС ИФА РАН (Карачаево-Черкессия)	43°43'59"	42°39'40"	DASIBI 1008 АН	0–500 млрд ⁻¹ (± 2 млрд ⁻¹) 0–1000 млрд ⁻¹ (± 1 млрд ⁻¹)
11	Вятские поляны (Кировская область)	56°13'33"	51°03'56"	3.02 П-А «ОПТЭК»	0–500 мкг/м ³ (± 20%)
12	Фоновая (Томская область)	56°25'07"	84°04'27"	Thermo Model 49	0–1000 млрд ⁻¹ (± 1 млрд ⁻¹)
13	TOR (Томская область)	56°28'41"	85°03'15"	3.02П-А «ОПТЭК»	0–500 мкг/м ³ (± 2 мкг/м ³)
14	БЭК (Томская область)	56°28'49"	85°06'08"	Ф-105 «ОПТЭК»	0–10000 мкг/м ³ (± 5 мкг/м ³)
15	Листвянка (Иркутская область)	51°50'48"	104°53'58"	Ф-105 «ОПТЭК»	0–10000 мкг/м ³ (± 5 мкг/м ³)
16	Иркутск (Иркутская область)	52°29'78"	104°29'60"	Ф-105 «ОПТЭК»	0–10000 мкг/м ³ (± 5 мкг/м ³)
17	Боярск (Бурятия)	51°50'22"	106°03'50"	3.02П-А «ОПТЭК»	0–500 мкг/м ³ (± 2 мкг/м ³)
18	Мосэкомониторинг (городской тип, гт)	55°39'10"– 55°50'59"	37°24'13"– 37°54'37"	Casella Monitor (Monitor Europe Ltd.) ME 9810B	0–498 мкг/м ³ (± 20%)
19	Мосэкомониторинг (транспортный тип, тт)			HORIBA Ltd APXA-370 мод. APOA-370 Environnement S.A. O3 42M OPSIS AB AR500	

восточной — Боярск. Из приземных станций самая северная — Апатиты, южная — СФЭМ «Карадаг». Фактически южнее находится КВНС, но это высокогорная станция, отличающаяся от остальных своим режимом поступления и стока озона.

2. Результаты мониторинга приземной концентрации озона

2.1. Среднегодовые данные

В связи с тем, что в нормативный документ [36] включена такая характеристика, как среднегодовая предельно допустимая концентрация озона ($\text{ПДК}_{\text{сг}}$) и сохранилась ранее введенная максимальная разовая концентрация ($\text{ПДК}_{\text{мр}}$), в настоящем раз-

деле рассмотрим их значения на территории России в 2024 г. (рис. 1, 2).

Рис. 1 показывает, что среднегодовое содержание озона в приземном слое воздуха на территории России изменяется от 17 до 92 $\text{мкг}/\text{м}^3$. Это соизмеримо с данными для Западной Европы [37], где заметно снизились выбросы газов-предшественников озона [38], и ниже, чем на территории Китая [39], который, как отмечалось выше, также активно занимается проблемой сокращения поступления подобных газов.

Из рис. 1 видно, что на 15 из 19 станций в 2024 г. фиксировалось превышение $\text{ПДК}_{\text{сг}}$. На шести станциях содержание озона было выше $2\text{ПДК}_{\text{сг}}$. На одной станции (Боярск) оно превысило $3\text{ПДК}_{\text{сг}}$ (измерения проводились не круглый год). В четырех

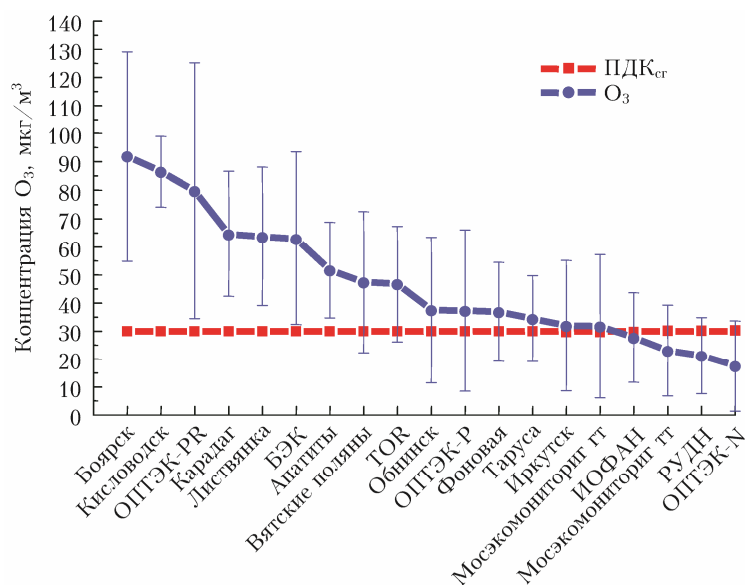


Рис. 1. Среднегодовая концентрация озона на территории РФ в 2024 г.

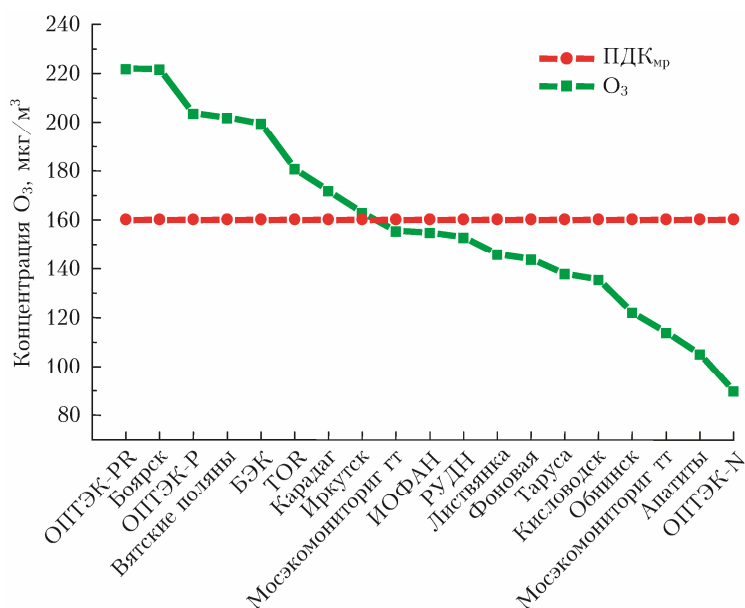


Рис. 2. Максимальные концентрации озона на станциях РФ в 2024 г.

пунктах наблюдений (ИОФ РАН, Мосэкомониторинг тт, РУДН и ОПТЭК-N) среднегодовые концентрации озона были ниже ПДК_{ст.}. По-видимому, сказывается близость транспортных потоков, в выбросах которых происходит гибель молекул О₃.

На рис. 2 приведены максимальные за час концентрации озона, которые наблюдались на каждой из станций в 2024 г., здесь же приведена ПДК_{мр.}. Видно, что максимальные за час концентрации изменялись от 90 до 222 мкг/м³. Значения, превышающие ПДК_{мр.}, фиксировались на восьми станциях, что значительно меньше, чем для ПДК_{ст.}, а также меньше, чем в Китае и США [39, 40]. Обращает на себя внимание и тот факт, что порядок станций на рис. 2 отличается от рис. 1. Это обусловлено особенностями годового хода в 2024 г. на каждой из станций, что будет рассмотрено ниже.

2.2. Межгодовая изменчивость

В обзорах [32–35] используются данные с ряда станций с 2020 г. по настоящее время. Это позволяет в первом приближении оценить многолетнюю изменчивость концентрации озона на них. Условно все станции разделены на три группы. В первую вошли те, на которых среднегодовые значения

изменялись менее чем на 15 мкг/м³, она самая большая (рис. 3, а). Во вторую вошли те, на которых рост концентрации был > 20 мкг/м³; таких пунктов оказалось два (рис. 3, б). Третья группа состоит из двух станций, на которых зафиксировано падение содержания озона более чем на 20 мкг/м³ (рис. 3, в).

Из рис. 3 можно сделать вывод, что на значительной части территории России концентрации озона колеблются около среднего уровня. Станции со значительным изменением ПКО расположены в мегаполисах Москве и Санкт-Петербурге. Возможно, наблюдающиеся на них в этих городах тенденции связаны с изменением антропогенной деятельности (автомобильный трафик, перенос или остановка предприятий и т.п.).

Рис. 4 отражает динамику ПКО в разных районах страны в 2020–2024 гг. Станции расположены в порядке убывания средней за пять лет концентрации. Видно, что на протяжении всего рассматриваемого периода концентрации озона на большинстве станций почти не изменялись. Значительные межгодовые отклонения от среднего многолетнего наблюдаются главным образом в Москве и Санкт-Петербурге, в пунктах наблюдений ОПТЭК-PR, ОПТЭК-Р и РУДН.

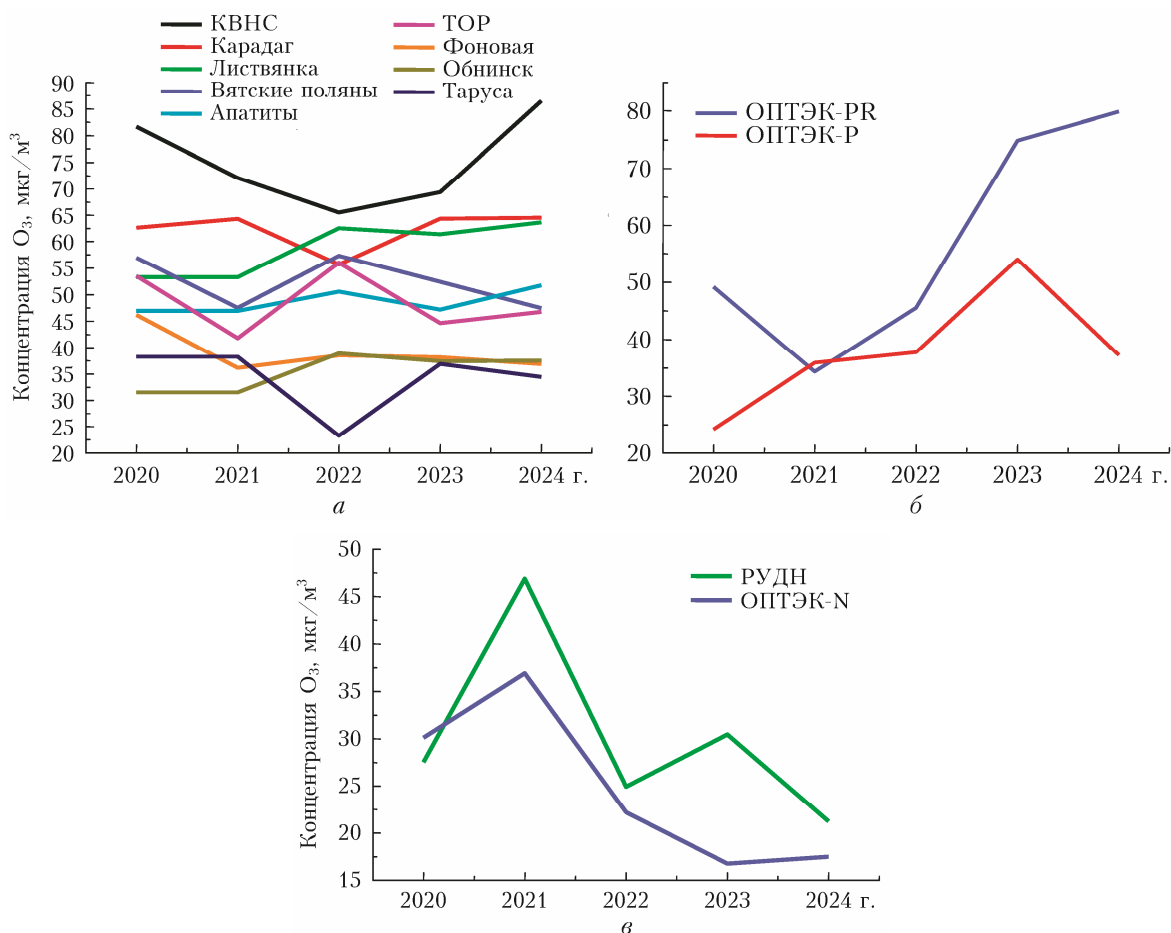


Рис. 3. Среднегодовые ПКО на территории РФ в 2020–2024 гг.: станции 1-ой группы (а), 2-ой группы (б), 3-ой группы (в)

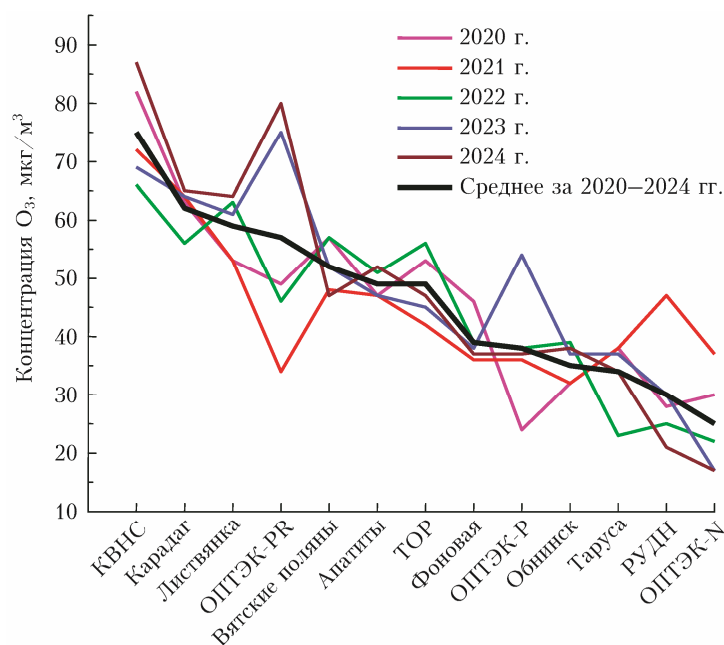


Рис. 4. Среднегодовые ПКО на территории России в 2020–2024 гг.

2.3. Годовой ход

Анализ годового хода концентрации озона проведен по максимальным за сутки средним за 8 ч и обычным среднесуточным данным. Они представлены на рис. 5. Станции расположены в порядке убывания среднегодовой концентрации озона в приземном слое воздуха в соответствии с данными на рис. 1. Здесь же горизонтальными линиями показаны уровни предельных среднесуточных концентраций (ПДК_{сс}) и ПДК_{мр} для оценки периодов превышения гигиенических нормативов.

Напомним, что в гигиеническом нормативе [36] ПДК_{сс} заменена на новый показатель — средняя за 8 ч концентрация озона (без указаний, как он рассчитывается). Его значение (100 мкг/м³) увеличено по сравнению с предыдущим СанПином в 3,33 раза. Согласно [41] ранее ПДК_{сс} = 30 мкг/м³. Если средняя за 8 ч концентрация рассчитывается путем скользящего среднего, тогда возникает вопрос: какое из 24 полученных значений использовать? Сутки также можно разбить на три равных отрезка и посчитать восьмичасовые средние. В этом случае также возникает вопрос: какое из трех значений принимать во внимание? Такой показатель введен ВОЗ и широко используется в зарубежных странах. Согласно руководящим документам ВОЗ [42] для озона принято рассчитывать суточный максимум средних за 8 ч 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). В дальнейшем будем следовать этим рекомендациям ВОЗ.

Из рис. 5 видно, что на территории РФ в 2024 г. наблюдались самые разные годовые вариации приземной концентрации озона. Это не удивительно,

учитывая громадную площадь государства и расположение пунктов мониторинга в разных физико-географических условиях.

В фоновых условиях, где отсутствуют или имеются небольшие антропогенные выбросы, как правило, фиксируется один основной годовой максимум концентрации весной [43, 44]. Весенний максимум наблюдался на ст. Листвянка, БЭК, Апатиты, Фонозная и Таруса (рис. 5, д, е, ж, м, н).

Один максимум содержания озона летом наблюдался в 2024 г. на ст. Карадаге, ТОР, ОПТЭК-Р, Иркутске, Мосэкомониторинга гт и тт, ИОФ РАН, РУДН и ОПТЭК-Н (рис. 5, з, и, л, м, н, о, п, р, с, т, у). Два почти одинаковых максимума концентрации озона были зафиксированы на ст. Боярский и Обнинск (рис. 5, а, к). По-видимому, это связано с действием местных региональных факторов.

Значительно отличается по характеру годового хода ПКО высокогорная станция КВНС (рис. 5, б), большую часть года находящаяся в воздухе свободной атмосферы [32–35]. Особенности местной горно-долинной циркуляции обуславливают незначительный приток воздуха из долины и перенос озона из верхних слоев тропосферы. Годовая амплитуда ПКО в 2024 г. в среднем не превышала 40 мкг/м³, и не было зафиксировано существенных (выше указанной величины) синоптических колебаний. Относительно небольшие вариации ПКО на станции в 2024 г. могут быть следствием преобладания переноса озона из стратосферы над адвекцией [45]. Следует отметить, что такие вариации ПКО на станции были не всегда. В 2021–2023 гг. размах годовых колебаний ПКО был таким же — ~ 40 мкг/м³, но ранее, в 2017–2020 гг., достигал 60–70 мкг/м³, по-видимому, вследствие большего влияния на ПКО адвекции, в том числе синоптического временного масштаба.

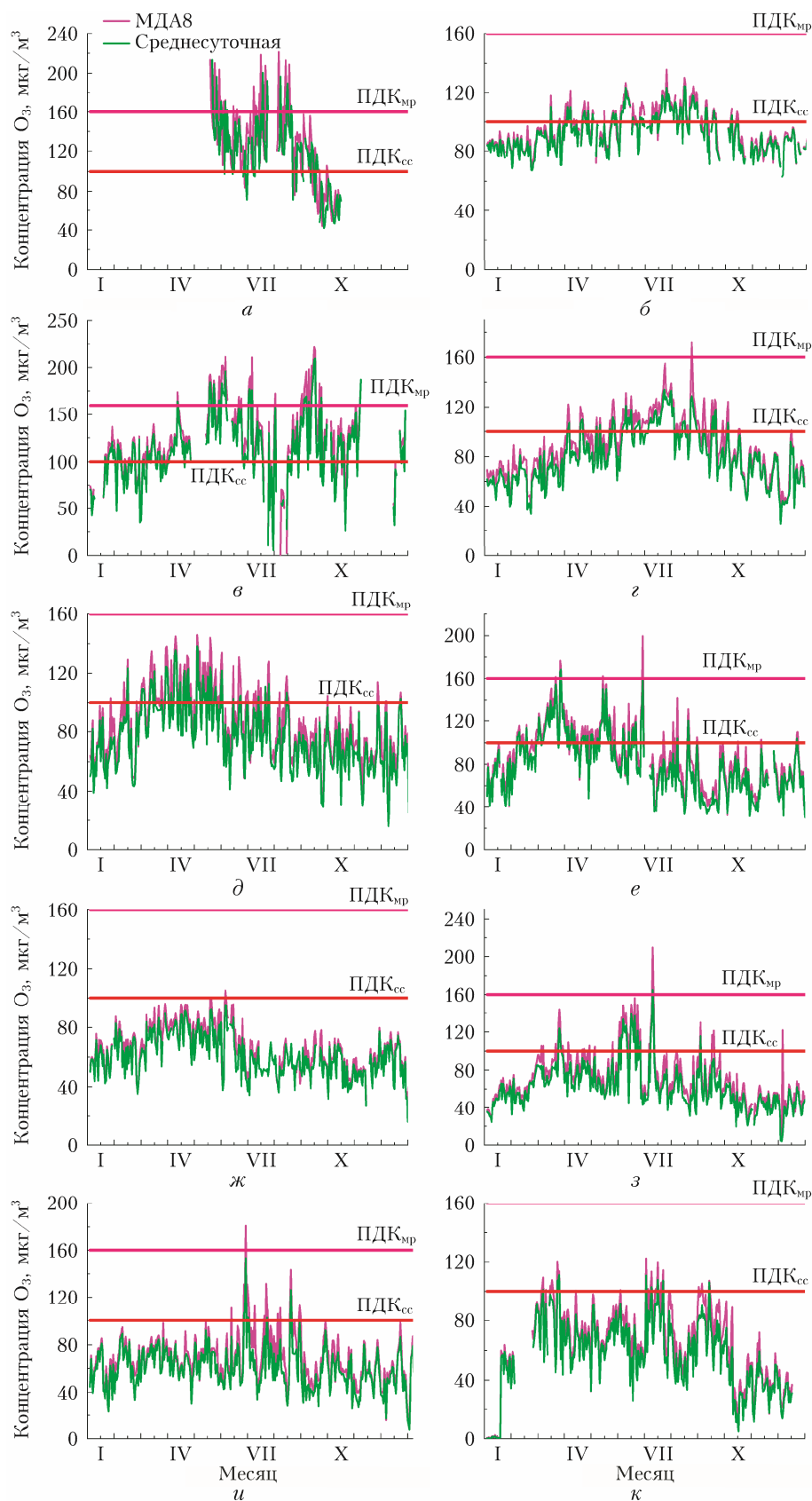
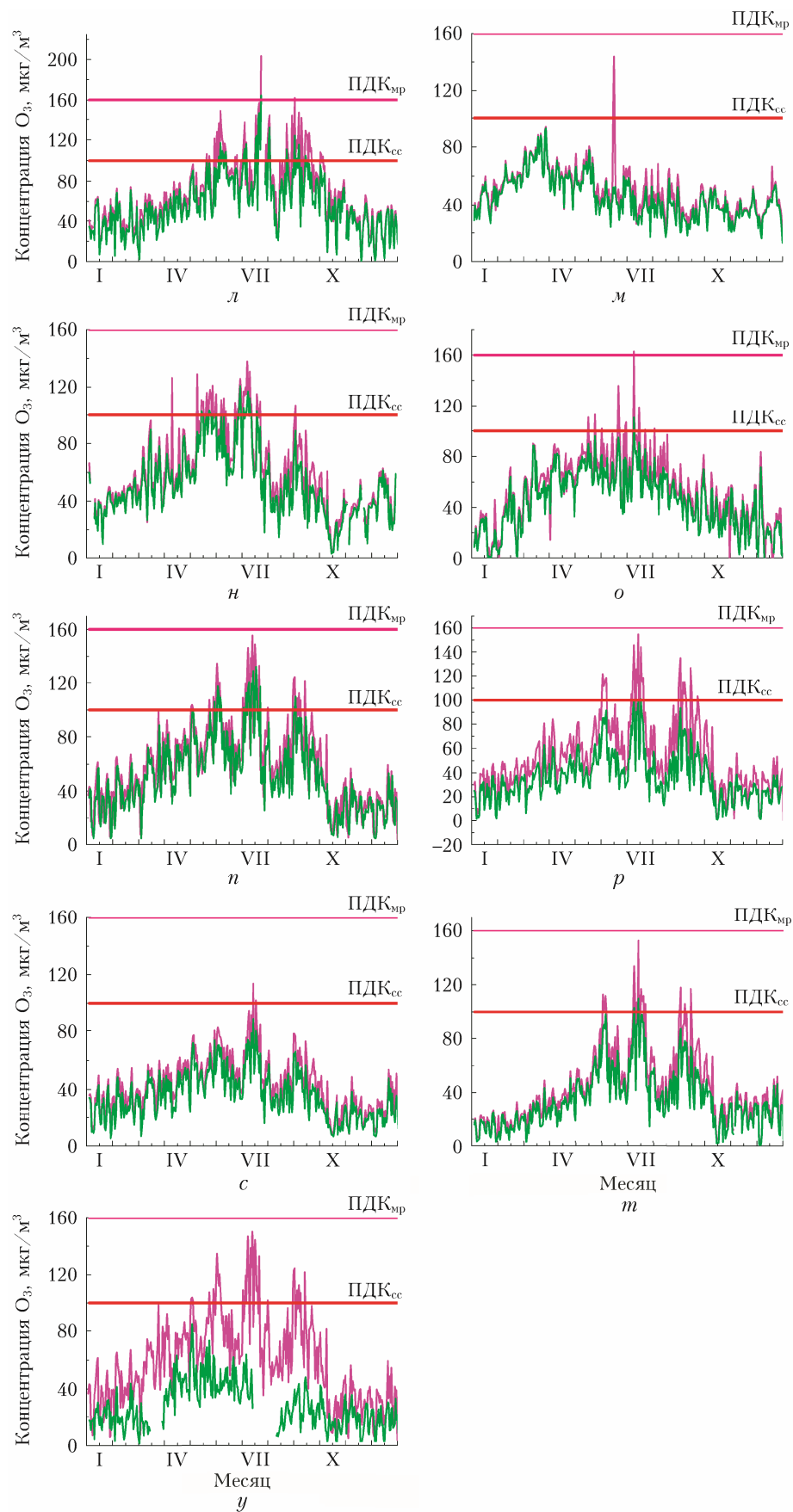


Рис. 5. Максимальные за сутки средние за 8 ч и среднесуточные ПКО в России в 2024 г. на станциях: Боярск (а); КВНС (б); ОПТЭК-PR (в); Карадаг (г); Листвянка (д); БЭК (е); Апатиты (ж); Вятские поляны (з); TOR (и); Обнинск (к); ОПТЭК-Р (л); Фоновая (м); Таруса (н); Иркутск (о); Мосэкомониторинг гт (п); Мосэкомониторинг тт (с); РУДН (т); ОПТЭК-N (у) (окончание см. на с. 752)



Окончание рис. 5 (начало см. на с. 751)

В течение 35 лет измерений ПКО на КВНС весной и летом регулярно возникали локальные максимумы среднемесячной концентрации озона, а в холодное время года — локальный минимум [46]. Особенностью последних трех лет, включая 2024 г., является практически полное отсутствие весеннего локального максимума, плавное нарастание концентрации в январе—августе с довольно резким спадом в сентябре и стабильным и низким плато в октябре—декабре. В 2024 г. абсолютные среднечасовые ПКО достигали в июле 135 мкг/м^3 , вплотную приблизившись к ближайшему рекордному значению ПКО на КВНС в 2020 г., равному 140 мкг/м^3 [32–36]. В целом ПКО на КВНС в 2024 г. выросли по сравнению с 2021–2023 гг., вернувшись к уровням 2017–2020 гг. Наблюдаемые в 2024 г. относительно высокие ПКО могут быть связаны с увеличением роли стратосферных вторжений в свободную тропосферу и последующим перемешиванием в зоне орографических возмущений [46, 47], а также с аномально теплым и сухим летне-весенним периодом 2024 г. в сочетании с повышенной продолжительностью солнечного сияния в этот период на большей части европейской части России, включая Южный федеральный округ [48]. Кроме того, экстремально высокие аномалии ПКО на КВНС могут быть обусловлены генерацией озона из его прекурсоров, транспортируемых к станции при дальнем переносе.

Рис. 5 также показывает, что на всех станциях в 2024 г. наблюдались периоды превышения ПДК_{сс}, на восьми — периоды превышения ПДК_{мр}.

Поскольку МДА8 представляет собой максимальное значение, полученное по восьмичасовым отсчетам, то оно на рис. 5 везде больше, чем среднесуточная концентрация. Можно увидеть, что на ст. ИОФ РАН, РУДН и ОПТЭК-N эти различия существеннее. Это объясняется большими суточными амплитудами содержания озона: высокими значениями днем и низкими ночью. В результате среднесуточная концентрация становится значительно ниже, чем отобранное по максимальной величине МДА8.

В заключение раздела остановимся на одном феномене, который проявился в 2023 г. на нескольких станциях, а в 2024 г. наблюдался почти на всех станциях (15 из 19). Речь идет о вторичном максимуме в годовом ходе концентрации озона, который проявляется в конце лета — начале осени. В предыдущих обзорах [32–35] мы связывали этот факт с особенностями общей циркуляции атмосферы и, в частности, с «бабьим летом» в регионе расположения станций. Возможно, в связи с потеплением климата эффект усилился, и вторичный максимум стал фиксироваться на большинстве станций.

2.4. Мезомасштабные различия в распределении ПКО

В трех регионах наблюдения (Санкт-Петербург, Томская область и Прибайкалье) озон в 2024 г. измерялся на нескольких станциях. Поскольку в период исследований перечисленные в предыдущих

разделах станции находились в сходных региональных погодных условиях, интересно рассмотреть, насколько различаются концентрации озона на мезомасштабном уровне. Такие данные необходимы при разработке требований к расположению станций и для определения темпа измерений на них [49, 50]. В предыдущем обзоре [35] приводились средние за год мезомасштабные различия. Сейчас остановимся на годовых (рис. 6) и суточных (рис. 7) межстанционных разностях концентраций.

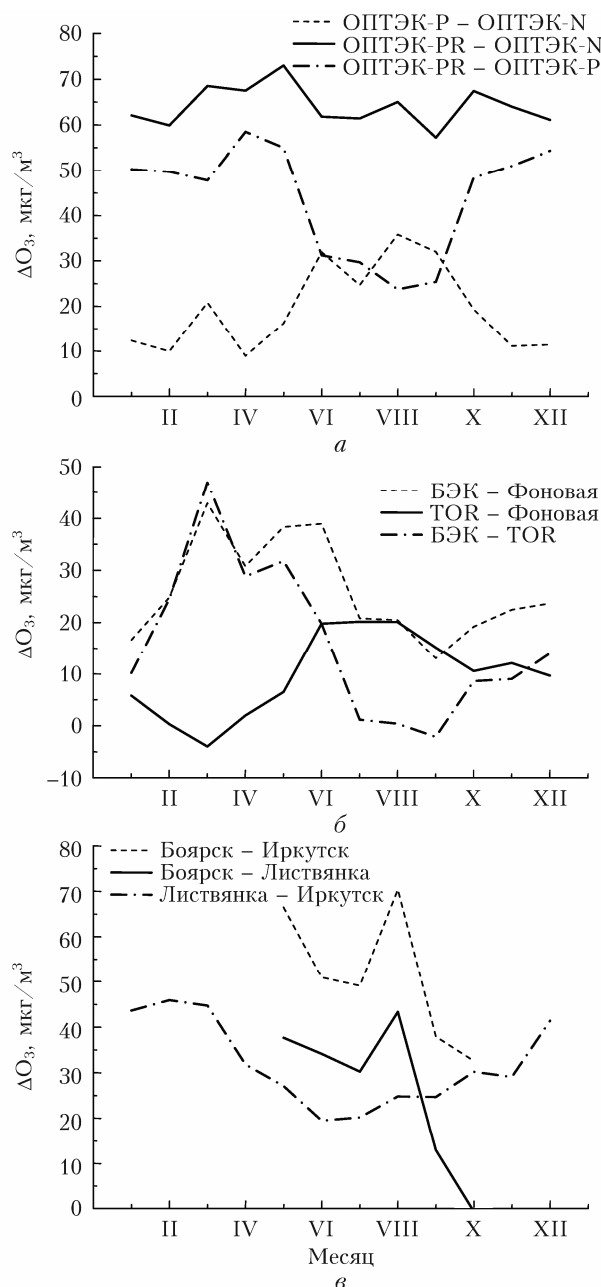


Рис. 6. Годовой ход разницы концентраций озона: Санкт-Петербург (а); Томская область (б); Прибайкалье (в)

Разница находилась вычитанием значений на станциях с меньшей ПКО из значений на станциях с большей концентрацией. Такой подход обусловил

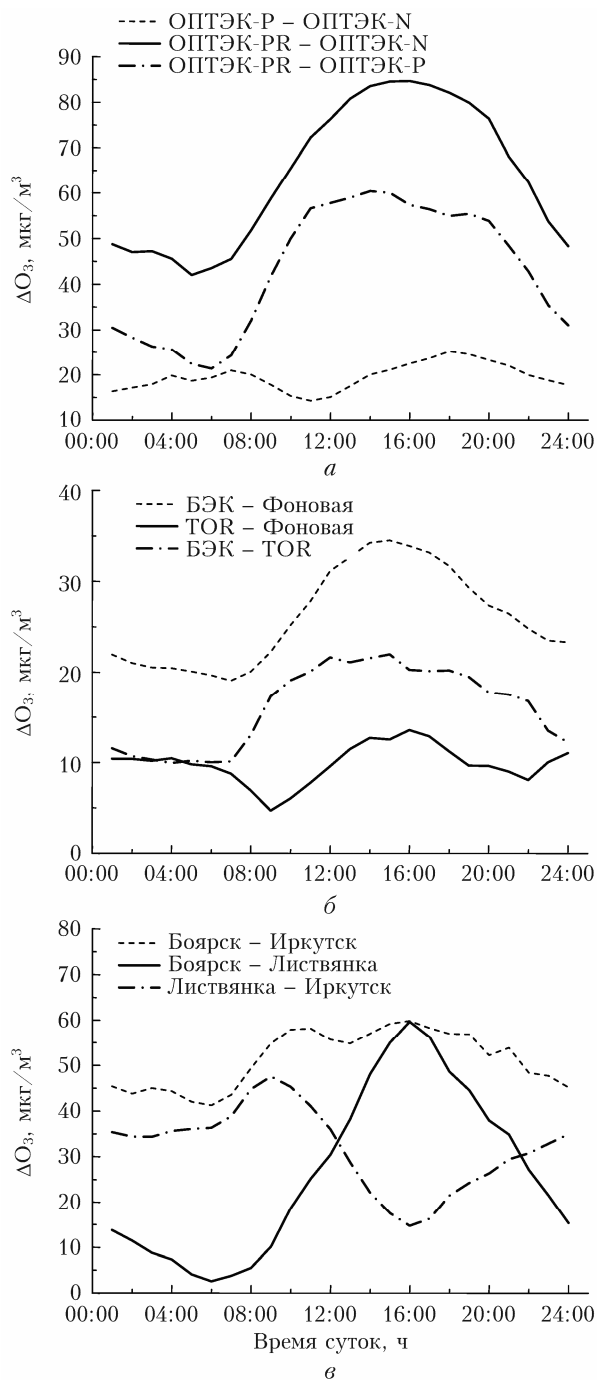


Рис. 7. Суточный ход разницы концентраций озона: Санкт-Петербург (а); Томская область (б); Прибайкалье (в)

в основном положительные различия (рис. 6). Хотя были зафиксированы периоды, когда результаты измерений на станциях с меньшей средней концентрацией превышают такие же значения в пунктах с большей ПКО (TOR – Фоновая в марте, БЭК – TOR в сентябре на рис. 6, а, Боярск – Листвянка в октябре на рис. 6, в).

Различия в концентрациях во всех регионах достигают 50–70 мкг/м³ и существенно изменяются в течение года. Наибольшая разница, как правило, наблюдается в период максимумов концентраций

в регионе (рис. 6, б и в). Можно отметить только пару станций ОПТЭК-PR и ОПТЭК-N, на которых разница почти не меняется в течение всего года.

В литературе удалось обнаружить только одну публикацию по данной тематике [43]. Результаты работы показывают, что разница концентраций озона может достигать 50 мкг/м³ на расстоянии 50 км, а соотношение концентраций может изменяться от двух до четырех раз для среднемесячных значений. Эти данные близки к полученным нами.

Из рис. 7 видно, что в течение суток среднемесячная разница концентраций между пунктами в одном регионе может достигать 88 мкг/м³. Она хорошо повторяет суточный ход концентрации озона. Максимальные различия фиксируются в дневное время, минимальные – в ночное. Исключением из этой общей закономерности являются разницы ПКО Боярск – Листвянка и Листвянка – Иркутск, имеющие противоположный ход. Возможно, это связано с тем, что Боярск и Листвянка находятся на берегу озера Байкал с хорошо развитой бризовой циркуляцией [44]. В этом случае, как показано в [51], концентрация озона убывает в системе бриза при удалении от берега. А поскольку пункты находятся на противоположных берегах, то и перенос озона в их системах тоже будет обратным.

3. Вертикальное распределение озона в тропосфере

Вертикальное распределение озона в тропосфере измерялось с помощью самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик» или Як-40; оборудование подробно описано в [52, 53]. Данные измерений 2024 г. представлены на рис. 8.

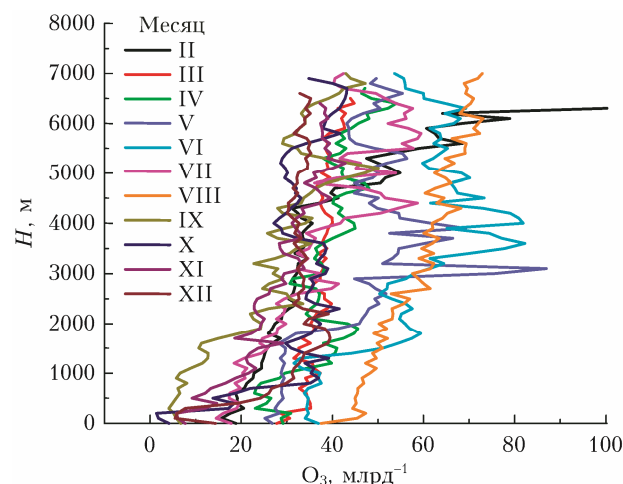


Рис. 8. Вертикальное распределение концентрации озона над югом Западной Сибири в 2024 г.

Из рис. 8 видно, что минимальные концентрации озона в 2024 г. наблюдались в сентябре, а максимальные – с мая по август в зависимости от рассматриваемой высоты. Наибольшее значение (> 100 млрд⁻¹) в верхней тропосфере зафиксировано в феврале.

Такой вертикальный профиль говорит о том, что процессы обмена со стратосферой были в этот период значительными, а генерация озона в тропосфере, наоборот, не очень интенсивной.

В целом все профили 2024 г. подобны, что, согласно исследованию вертикального распределения газов-предшественников озона, говорит о небольшом поступлении легколетучих органических соединений в атмосферу Западной Сибири [54, 55].

Сопоставление представленных на рис. 9 данных вертикального распределения с ранее полученными результатами для этого же региона [32–35] показывает, что в 2024 г. концентрация озона была несколько ниже, чем в предыдущие годы. По-видимому, находит отражение многолетняя цикличность атмосферных процессов.

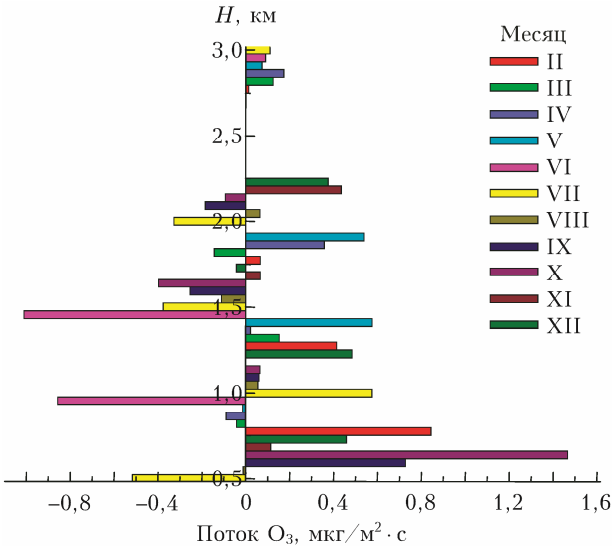


Рис. 9. Вертикальные потоки озона над Западной Сибирью в 2024 г.

Согласно рис. 9, наибольшие значения потоков озона наблюдаются в нижней части пограничного слоя и на его верхней границе, в зоне вовлечения. Их величина и даже знак изменяются в течение года. Выше пограничного слоя значение потоков существенно уменьшается и уже на высоте 3 км не превышает $0,2 \text{ мкг/м}^2 \cdot \text{с}$. Пока нам не удалось обнаружить аналогичные работы по озону. Имеются только публикации по парниковым газам.

4. Соответствие концентрации озона в России гигиеническим нормативам

Напомним, что с 2021 г. санитарными правилами и нормами [36] в России установлены следующие нормативы, определяющие ПДК озона:

- ПДК_{гр} (30 мкг/м^3) – концентрация, обеспечивающая допустимые (приемлемые) уровни риска при хроническом (не менее одного года) воздействии;
- ПДК_{сс} (100 мкг/м^3) – концентрация, обеспечивающая допустимые (приемлемые) уровни рис-

ка при воздействии не менее 24 ч; для озона это максимальная средняя за 8 ч концентрация в данные сутки;

– ПДК_{мр} (160 мкг/м^3) – концентрация, предотвращающая раздражающее действие, рефлекторные реакции, запахи при воздействии до 20–30 мин.

В табл. 2 приведен перечень станций наблюдения за содержанием озона в 2024 г., на которых отмечены случаи превышения ПДК.

Таблица 2
Превышение ПДК озона в России в 2024 г.

Станция	Количество случаев превышения ПДК		Превышение ПДК _{гр} , мкг/м³	Количество измерений в 2023 г.
	ПДК _{мр}	ПДК _{сс}		
Апатиты			1,7	354
Вятские поляны	1	6	1,6	365
Листьянка		16	2,1	366
Кисловодск		37	2,9	334
Апатиты			1,7	354
Карадаг		7	2,2	366
Мосэкомониторинг гт			1,1	366
Мосэкомониторинг тт			0,8	366
Обнинск			1,2	324
ОПТЭК-N			0,6	326
ОПТЭК-Р	1	4	1,2	349
ОПТЭК-PR	28	63	2,7	275
TOR	1	1	1,6	366
БЭК	5	33	2,1	354
Фоновая			1,2	366
РУДН		2	0,7	363
Таруса		19	1,1	365
ИОФ РАН		1	0,9	366
Иркутск			1,1	363
Боярск	12	58	3,1	129

Данные табл. 2 показывают, что ПДК_{мр} была превышена в 2024 г. на шести городских или пригородных станциях. Это говорит о том, что добавка возникает за счет антропогенных выбросов. В 2024 г. увеличилось количество станций, на которых было зафиксировано превышение ПДК по сравнению с предыдущим годом (4 станции), но уменьшились периоды, когда была превышена ПДК_{мр}. ПДК_{сс} превышена на 12 станциях. В прошлом году таких пунктов было 15. Уменьшилось и количество суток с превышением ПДК_{сс}.

Соотношение ПДК_{гр} и ПКО по сравнению с 2023 г. поменялось незначительно. В 2023 г. станций с превышением ПДК_{гр} было 16 (общее количество 18), в 2024 г. – 16 (19). Незначительно изменились количество случаев и величины превышения.

Таким образом, среднее содержание озона в приземном слое воздуха в 2024 г. стало меньше, чем в 2023 г.

Заключение

В настоящем обзоре обобщены результаты мониторинга озона в приземном слое воздуха в 2024 г. на 19 станциях. Станции расположены в разных частях России, что дает представление о его распределении по территории страны. Концентрация озона изменялась в 2024 г. от минимально регистрируемой прибором до 220 мкг/м³. Среднегодовые значения находились в пределах 17–92 мкг/м³. Мезомасштабные различия в концентрациях достигали 90 мкг/м³.

Результаты мониторинга озона показали, что его концентрация на территории РФ оказалась несколько ниже, чем в 2023 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. Такая ситуация говорит о необходимости широкого информирования населения о результатах мониторинга и возможных последствиях от превышения гигиенического норматива. Она также требует выработки природоохранных мероприятий по снижению концентрации озона в приземном слое воздуха.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственных заданий РУДН, ИОА СО РАН, АО «ОПТЭК», ПГИ РАН, ИФА РАН, ИФМ СО РАН, ИОФ РАН, ГМЦ, КНС – ПЗ РАН филиал ФИЦ ИнБЮМ (№ 124030100098-0), ГПБУ «Мосэкомониторинг», ЛИИ СО РАН, НПО «Тайфун».

Список литературы

1. Лунин 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*. 2015. 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.
6. 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. DOI: 10.1088/1748-9326/aa7885.
7. 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. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118690.
8. Altshuller A.P., Wartburg A.F. The interaction of ozone with plastic metallic materials in a dynamic flow system // *Int. J. Air Water Pollut.* 1961. V. 4, N 1–2. P. 70–78.
9. Daubendick R.L., Calvert J.G. The reaction of ozone with perfluorinated polyolefins // *Environ. Lett.* 1974. V. 6, N 4. P. 253–272. DOI: 10.1080/00139307409437369.
10. Screpani A., De Marco A. Corrosion on cultural heritage buildings in Italy: A role for ozone? // *Environ. Pollut.* 2009. V. 157, N 5, P. 1513–1520. DOI: 10.1016/j.envpol.2008.09.046.
11. 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. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2007.10.001.
12. 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.
13. Белан Б.Д. Озон в тропосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 488 с.
14. Robinson A.L., Donahue N.M., Shrivastava M.K., Weitkamp E.A., Sage A.M., Grieshop A.P., Lane T.E., Pierce J.R., Pandis S.N. Rethinking organic aerosols: Semi-volatile emissions and photochemical aging // *Science*. 2007. V. 315, N 5816. P. 1259–1262. DOI: 10.1126/science.1133061.
15. Ivatt P.D., Evans M.J., Lewis A.C. Suppression of surface ozone by an aerosol-inhibited photochemical ozone regime // *Nature Geosci.* 2022. V. 15, N 7. P. 536–540.
16. 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. DOI: 10.1126/science.abn0340.
17. Tarasick D., Galbally I.E., Cooper O.R., Schultz M.G., Ancellet G., Leblanc T., Wallington T.J., Ziemke J., Liu X., Steinbacher M., Staehelin J., Vigouroux C., Hannigan J.W., Garcia O., Foret G., Zanis P., Weatherhead E., Petropavlovskikh I., Worden H., Osman M., Liu J., Chang K.-L., Gaudel A., Lin M., Granados-Muñoz M., Thompson A.M., Oltmans S.J., Cuesta J., Dufour G., Thouret V., Hassler B., Trickl T., Neu J.L. Tropospheric ozone assessment report: Tropospheric ozone from 1877 to 2016, observed levels, trends and uncertainties // *Elem. Sci. Anth.* 2019. V. 7, N 39. P. 376.
18. Alvim-Ferraz M.C.M., Sousa S.I.V., Martins F.G., Ferraz M.P. Tropospheric and stratospheric ozone: Scientific history and shifts in early perspectives regarding the impact on human health // *Atmosphere*. 2024. V. 15, N 12. P. 1504. DOI: 10.3390/atmos15121504.
19. Белан Б.Д., Савкин Д.Е., Толмачев Г.Н. Зависимость образования озона в приземном слое от температуры воздуха // *Оптика атмосф. и океана*. 2017. Т. 30, № 11. С. 971–979; Belan B.D., Savkin D.E., Tolmachev G.N. Generation of ozone in the surface air layer versus air temperature // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 2. P. 187–196.
20. Qin M., She Y., Wang M., Wang H., Chang Y., Tan Z., An J., Huang J., Yuan Z., Lu J., Wang Q.,

- Liu C., Liu Z., Xie X., Li J., Liao H., Pye H.O.T., Huang C., Guo S., Hu M., Zhang Y., Jacob D.J., Hu J. Increased urban ozone in heatwaves due to temperature-induced emissions of anthropogenic volatile organic compounds // *Nature Geosci.* 2025. V. 18, N 1. P. 50–56. DOI: 10.1038/s41561-024-01608-w.
21. Tollefson J. Earth breaches 1.5 °C climate limit for the first time: What does it mean? // *Nature.* 2025. V. 637, N 8047. P. 769–770.
 22. Nelson B.S., Liu Z., Squires F.A., Shaw M., Hopkins J.R., Hamilton J.F., Rickard A.R., Lewis A.C., Shi Z., Le J.D. The effect of different climate and air quality policies in China on in situ ozone production in Beijing // *Atmos. Chem. Phys.* 2024. V. 24, N 16. P. 9031–9044. DOI: 10.5194/acp-24-9031-2024.
 23. East J.D., Monier E., Saari R.K., Garcia-Menendez F. Projecting changes in the frequency and magnitude of ozone pollution events under uncertain climate sensitivity // *Earth's Future.* 2024. V. 12, N 6. P. 003941. DOI: 10.1029/2023EF003941.
 24. 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. DOI: 10.1088/1748-9326/ac8695.
 25. 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. DOI: 10.5194/acp-22-1707-2022.
 26. 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. DOI: 10.1029/2021JD035606.
 27. 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.
 28. Fang H., Wang W., Wang R., Xu H., Zhang Y., Wu T., Zhou R., Zhang J., Ruan Z., Li F., Wang X. Ozone and its precursors at an urban site in the Yangtze River delta since clean air action plan phase II in China // *Environ. Pollut.* 2024. V. 347. P. 123769. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.123769.
 29. Zhang L., Wang L., Liu B., Tang G., Liu B., Li X., Sun Y., Li M., Chen X., Wang Y., Hu B. Contrasting effects of clean air actions on surface ozone concentrations in different regions over Beijing from May to September 2013–2020 // *Sci. Total. Environ.* 2023. V. 903. P. 166182. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166182.
 30. 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., Скорород 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.
 31. Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2022 г. // Ежегодник ФГБУ «ГГО». М.: [Б.и.], 2023. 255 с.
 32. 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., Фофонов А.В., Челибанов И.В., Челибанов В.П., Широтов В.В. Приземная концентрация озона на территории России в первом полугодии 2020 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2020. Т. 33, № 9. С. 710–721. 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., Savkin D.E., Senik I.A., Stepanov E.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V., Chelibanov I.V., Chelibanov V.P., 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.
 33. 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., Фофонов 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/AOO20220706; Andreev V.V., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., Deminc 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.
 34. 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., Фофонов 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/AOO20230804; 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., Shirotov V.V., Shukurov K.A. Tropospheric ozone concentration in Russia in 2022 // Atmos. Ocean. Opt. 2023. V. 36, N 6. P. 741–757.
35. Андреев В.В., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Гордюшкин В.А., Давыдов Д.К., Демин В.И., Дудорова Н.В., Еланский Н.Ф., 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., Марченко О.О., Оболкин В.А., Постыляков О.В., Потемкин В.Л., Савкин Д.Е., Семутникова Е.Г., Сеник И.А., Степанов Е.В., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В., Ходжер Т.В., Челибанов И.В., Челибанов В.П., Широтов В.В., Штабкин Ю.А., Шукуров К.А. Концентрация тропосферного озона на территории России в 2023 г. // Оптика атмосф. и океана. 2024. Т. 37, № 8. С. 688–698. DOI: 10.15372/AOO 20240809; Andreev V.V., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Gordyushkin V.A., Davydov D.K., Demin V.I., Dudorova N.V., Elansky N.F., 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., Marchenko O.O., 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., Shirotov V.V., Shtabkin Yu.A., Shukurov K.A. Tropospheric ozone concentration in Russia in 2023 // Atmos. Ocean. Opt. 2024. V. 37, N 6. P. 849–864.
 36. 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.
 37. Adame J.A., Gutierrez-Alvares I., Notario A., Yela M. Surface ozone trends reversal for June and December in an Atlantic natural coastal environment // Environ. Sci. Pollut. Res. 2024. V. 31. P. 17461–17471. DOI: 10.1007/s11356-024-32344-8.
 38. Aas W., Fagerli H., Alastuey A., Cavalli F., Degorska A., Feigenspan S., Brenna H., Glib J., Heinesen D., Hueglin C., Holubová A., Jean-Luc Jaffrezo J.-L., Mortier A., Murovec M., Putaud J.P., Rüdiger J., Simpson D., Solberg S., Tsyro S., Tørseth K., Yttri K.E. Trends in air pollution in Europe, 2000–2019 // Aerosol Air Qual. Res. 2024. V. 24, N 4. P. 230237. DOI: 10.4209/aaqr.230237.
 39. Wang B., Meiping Sun M., Si L., Niu Z. Spatio-temporal variation of O₃ concentration and exposure risk assessment in key regions of China, 2015–2021 // Atmos. Pollut. Res. 2024. V. 15, N 1. P. 101941. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134843.
 40. Parrish D.D., Faloona I.C., Derwent R.G. Maximum ozone concentrations in the southwestern US and Texas: Implications of the growing predominance of the background contribution // Atmos. Chem. Phys. 2025. V. 25, N 1. P. 263–289. DOI: 10.5194/egusphere-2024-342.
 41. 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.).
 42. WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and carbon monoxide // WMO, 2021. 275 p.
 43. Stockwell W.R., Fitzgerald R.M., Lu D., Perea R. Differences in the variability of measured and simulated tropospheric ozone mixing ratios over the Paso del Norte Region // J. Atmos. Chem. 2013. V. 70, N 1. P. 91–104.
 44. Бурман Э.А. Местные ветры. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 341 с.
 45. Сеник И.А., Еланский Н.Ф., Беликов И.Б., Лисицына Л.В., Галактионов В.В., Кортунова З.В. Основные закономерности временной изменчивости приземного озона на высотах 870 и 2070 м в районе г. Кислородска // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2005. Т. 41, № 1. С. 78–91.
 46. 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.
 47. 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.
 48. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 г. М., 2025. 104 с.
 49. Решетов В.Д. Изменчивость метеорологических элементов в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 215 с.
 50. О составе, точности и пространственно-временном разрешении информации необходимой для гидрометеорологического обеспечения народного хозяйства и службы гидрометеорологических прогнозов / под ред. М.А. Петросянц, В.Д. Решетов. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 220 с.
 51. Huang Y.Y., Donaldson D.J. Measurement report: Observations of ground-level ozone concentration gradients perpendicular to the Lake Ontario shoreline // Atmos. Chem. Phys. 2024. V. 24, N 4. P. 2387–2398. DOI: 10.5194/egusphere-2023-1751.
 52. Belan B.D., Ancellet G., Andreeva I.S., Antokhin P.N., Arshinov 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., 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. DOI: 10.5194/amt-15-3941-2022.
 53. Белан Б.Д., Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В.,

- Пестунов Д.А., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Самолет-лаборатория ЯК-40 для измерения потоков парниковых газов. Патент на полезную модель № 228158 от 16.08.2024.
54. Karl T. Mapping urban haze // *Science*. 2024. V. 384, N 6702. P. 1299. DOI: 10.1126/science.adq1423.
55. Li X., Wang W., Yang S., Cheng Y., Zeng L., Yu X., Lu S., Liu Y., Hu M., Xie S., Huang X., Zhou J., Shi L., Xu H., Lin S., Liu H., Feng M., Song D., Tan Q., Zhang Y. Ozone sensitivity regimes vary at different heights in the planetary boundary layer // *Sci. Total Environ.* 2024, V. 944. P. 173712. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173712.

V.V. Andreev, P.N. Antokhin, M.Yu. Arshinov, V.G. Arshinova, B.D. Belan, S.B. Belan, V.A. Gordyushkin, D.K. Davydov, V.I. Demin, N.V. Dudorova, N.F. Elansky, G.S. Zhamsueva, Zh.A. Zheurova, A.S. Zayakhanov, R.V. Ivanov, G.A. Ivlev, A.V. Kozlov, 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, A.M. Puhovich, D.E. Savkin, E.G. Semutnikova, I.A. Senik, T.K. Sklyadneva, E.V. Stepanov, G.N. Tolmachev, A.V. Fofonov, E.Yu. Khadzhiskaya, T.V. Khodzher, I.V. Chelibanov, V.P. Chelibanov, V.V. Shirotov, Yu.A. Shtabkin, K.A. Shukurov. **Tropospheric ozone concentration in Russia in 2024.**

Ozone in the surface air layer in high concentrations is a powerful oxidizer that has a negative impact on biological objects and environmental elements. Therefore, it is very important to study the dynamics of its concentration in all regions of the planet. In the work, based on annual monitoring data, ozone concentrations in Russia in 2024, mesoscale differences in its content in individual regions, and its vertical distribution according to aircraft sounding data are considered; the comparison with hygienic standards is made. It is shown that the annual average ozone content in the surface air layer across Russia varied from 17 to 92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; and hourly maxima, from 90 to 222 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. In the annual course, the concentration maximum is usually observed in spring under background conditions and in summer in urban areas. A secondary maximum became noticeable at background stations in early autumn. The magnitude of mesoscale differences in concentrations reaches 50–70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and changes significantly during the day and year. In most measurement points, the maximum permissible daily average concentrations established by the domestic hygienic standard were exceeded: maximum one-time, daily average, and annual average. The current situation necessitates wide public awareness of the monitoring results and the development of environmental protection measures to reduce the level of ozone and its precursors concentration in the ground layer of air.