

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.510.42

## Концентрация тропосферного озона на территории России в 2021 г.

В.В. Андреев<sup>1✉</sup>, М.Ю. Аршинов<sup>2</sup>, Б.Д. Белан<sup>2</sup>, С.Б. Белан<sup>2</sup>, Д.К. Давыдов<sup>2</sup>,  
В.И. Демин<sup>3</sup>, Н.В. Дудорова<sup>2</sup>, Н.Ф. Еланский<sup>4</sup>, Г.С. Жамсуева<sup>5</sup>,  
А.С. Заяханов<sup>5</sup>, Г.А. Ивлев<sup>2</sup>, А.В. Козлов<sup>2</sup>, Л.В. Коновальцева<sup>1</sup>,  
С.Н. Котельников<sup>6</sup>, И.Н. Кузнецова<sup>7</sup>, В.А. Лапченко<sup>8</sup>, Е.А. Лезина<sup>9</sup>,  
В.А. Оболкин<sup>10</sup>, О.В. Постыляков<sup>4</sup>, В.Л. Потемкин<sup>10</sup>, Д.Е. Савкин<sup>2</sup>,  
И.А. Сеник<sup>4</sup>, Е.В. Степанов<sup>6</sup>, Г.Н. Толмачев<sup>2</sup>, А.В. Фофонов<sup>2</sup>, Т.В. Ходжер<sup>10</sup>,  
И.В. Челибанов<sup>11</sup>, В.П. Челибанов<sup>11</sup>, В.В. Широков<sup>12</sup>, К.А. Шукуров<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Российский университет дружбы народов  
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

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

<sup>3</sup>Полярный геофизический институт РАН  
184209, Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Академгородок, 26а

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

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

<sup>6</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН  
111933, г. Москва, ул. Вавилова, 38

<sup>7</sup>Гидрометцентр России  
123242, г. Москва, Большой Предтеченский пер., 11–13

<sup>8</sup>Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН –  
филиал Института биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН

298188, г. Феодосия, п.г.т. Курортное, ул. Науки, 24

<sup>9</sup>Мосэкомониторинг  
119019, г. Москва, ул. Новый Арбат, 11, стр. 1

<sup>10</sup>Лимнологический институт СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3

<sup>11</sup>Приборостроительное предприятие «ОПТЭК»  
199178, г. Санкт-Петербург, Малый проспект В.О., 58

<sup>12</sup>НПО «Тайфун»  
249038, г. Обнинск Калужской области, ул. Победы, 4

Поступила в редакцию 7.04.2022 г.;  
после доработки 28.04.2022 г.;  
принята к печати 16.05.2022 г.

Озон – одна из самых токсичных примесей в тропосфере. Поэтому в большинстве стран он относится к основным загрязнителям и ведется постоянный мониторинг его концентрации. Настоящая работа представляет собой обзор непрерывных измерений содержания озона в тропосфере на территории России за весь 2021 г., осуществлявшихся по инициативе научных и образовательных организаций в разных регионах страны на 17 станциях. Результаты мониторинга показали, что в течение значительной части года среднесуточная концентрация озона превышала уровень ПДК<sub>с.с</sub> во всех пунктах проведения наблюдений, на ряде станций в два и даже три раза. На шести станциях зафиксирована концентрация выше максимальной разовой ПДК<sub>м.р</sub>. Такое поведение концентрации озона требует более полного анализа состава и концентрации озонобразующих веществ и разработки мероприятий по уменьшению их эмиссии в атмосферу.

*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 Дени-  
сович Белан (bbd@iao.ru); Сергей Борисович Белан (bsb@

iao.ru); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru);  
Валерий Иванович Демин (demin@pgia.ru); Нина Викто-  
ровна Дудорова (ninosh@mail.ru); Николай Филиппович

## Введение

Актуальность исследования тропосферного озона определяется физико-химическими свойствами этого газа [1–5] и воздействием, которое он оказывает на биологические субъекты и объекты окружающей среды при повышении содержания в воздухе.

Как показали биологические и медицинские исследования, озон в тропосфере является сильнодействующим ядом, обладающим, помимо общетоксического действия, такими свойствами, как мутагенность, канцерогенность, радиомиметический эффект (действие на кровь подобно ионизирующей радиации) [2–4]. Согласно [6] 30-минутное вдыхание озона при концентрации 0,8 мг/л эквивалентно дозе облучения в 100 рентген. По степени токсичности озон превосходит такой известный яд, как синильная кислота. Поэтому нормативным документом [7] он относится к первому классу опасности.

В больших концентрациях озон сильно угнетает жизнедеятельность растений. Их реакция на повышение концентрации озона выражается в уменьшении урожайности, а иногда и гибели. По подсчетам американских ученых [8], на территории США экономические потери от снижения продуктивности посевов составляют от 1,9 до 3,3 трлн долларов ежегодно. Такие же потери для части Юго-Восточной Азии составляют 68 млрд долларов [9]. Кроме уменьшения урожайности, озон еще и снижает способность растений поглощать углекислый газ, что может привести к усилению радиационного форсинга планеты [10, 11].

Помимо вышеперечисленного, озон – мощный окислитель, он разрушает резину, каучук, окисляет многие металлы, даже платиновой группы [12–16].

Имея продолжительное время жизни в атмосфере (от нескольких дней до нескольких месяцев) и интенсивные линии поглощения солнечного излучения, тропосферный озон играет значительную роль в парниковом эффекте. По оценкам [17], его вклад превышает 8% общего нагревания воздуха, обусловленного поглощением солнечного излучения парниковыми газами. Более поздние оценки показывают, что величина этого вклада может быть и больше.

Такое многообразие возможных отрицательных последствий от увеличения концентрации тропосферного озона как для человека, так и для окружающей

среды требует повышенного внимания к тенденциям изменения его содержания в приземном воздухе. Во всех развитых странах этот газ рассматривается как загрязнитель воздуха номер один. По данным авторов [18], в Европе уже в 2003 г. насчитывалось более 10 тыс. станций контроля за предшественниками озона и за ним самим. Самое главное, что информация доводится до населения и используется для принятия решений органами управления. В США и Европе уже удалось добиться снижения его концентрации в воздухе. Так, в Великобритании, по данным 119 станций, в результате принятых мер произошло снижение концентрации приземного озона с 1980 по 2019 г. в 2–6 раз в зависимости от региона [19]. В США удалось снизить выбросы его прекурсоров в 2 раза [20, 21]. По такому же пути пошел и Китай, но пока ему удалось значительно снизить выбросы предшественников озона лишь в отдельных отраслях [22–24].

В бывшем СССР и нынешней России мониторинг и мероприятия по уменьшению содержания озона не получили должного внимания. Росгидромет, на который возложен мониторинг его содержания, проводит технологическую модернизацию наблюдательной сети и пока измерения приземного озона осуществляет лишь в немногих крупных и промышленных городах. В двух самых больших мегаполисах России – Санкт-Петербурге и Москве – имеются сравнимые с зарубежными аналогами системы мониторинга приземного озона и других загрязняющих веществ. В Москве с 2002 г. функционирует сеть экологического мониторинга ГПБУ «Мосэкомониторинг» – специально уполномоченной организации г. Москвы по государственному экологическому мониторингу [25]. Регулярные измерения концентрации приземного озона проводятся на 17 станциях автоматического контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) ежечасно и круглосуточно. В базу данных записываются средние значения за 20-минутный интервал. На сети станций «Мосэкомониторинга» измерения проводятся газоанализаторами трех видов, работающими на основе метода ультрафиолетовой фотометрии: Casella Monitor ME 9810B, Environment S.A. O3 42M, HORIBA Ltd APXA-370 мод. APOA-370, и одним прибором OPSIS AB AR500, основанным на методе дифференциальной оптико-абсорбционной спектроскопии. Приборы внесены в Государственный реестр средств измерений и поверены в Государственной метрологической службе.

---

Еланский (n.f.elansky@mail.ru); Галина Санжиевна Жамсуева (galinazham@gmail.com); Александр Савельевич Заяханов (lmza@mail.ru); Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru); Артем Владимирович Козлов (artem@iao.ru); Людмила Владимировна Коновальцева (konovaltseva\_lv@pfur.ru); Сергей Николаевич Котельников (skotelnikov@mail.ru); Ирина Николаевна Кузнецова (labmuza@mail.ru); Владимир Александрович Лапченко (ozon.karadag@gmail.com); Елена Александровна Лезина (LezinaEA@eco.mos.ru); Владимир Аркадьевич Оболкин (obolkin@lin.irk.ro); Олег Вадимович Постыляков (oleg.postylyakov@gmail.com);

Владимир Львович Потемкин (klimat@lin.irk.ru); Денис Евгеньевич Савкин (sde@iao.ru); Ирина Анатольевна Сенник (senik\_ia@list.ru); Евгений Валерьевич Степанов (Eugene Stepanov@yandex.ru); Геннадий Николаевич Толмачев (tgn@ipc.tsc.ru); Александр Владиславович Фофанов (alenfo@iao.ru); Тамара Викторовна Ходжер (khodzher@lin.irk.ru); Иван Владимирович Челибанов (ichelibanov@gmail.com); Владимир Петрович Челибанов (chelibanov@gmail.com); Вадим Викторович Широтов (shirotov@rpatyphoon.ru); Карим Абдурахимович Шукуров (karim.shukurov@ifaran.ru).

В ежегодном докладе публикуются аналитические материалы о состоянии окружающей среды в Москве [26]. Однако в государственных докладах данные о содержании приземного озона на территории России до сих пор не приводятся [27, 28]. На остальной территории РФ наблюдения за озоном проводятся в инициативном порядке, в основном научными или вузовскими организациями.

Цель настоящего обзора – информирование научной общественности о содержании озона в приземном слое воздуха в 2021 г., а также о причинах его изменчивости и соответствии фиксируемых в разных пунктах мониторинга концентраций озона отечественным гигиеническим нормативам [7].

В обзоре использованы данные, полученные соавторами в 17 пунктах России, различающихся своими географическими и климатическими характеристиками, а также антропогенной нагрузкой на окружающую среду. Пространственно-временная изменчивость приземного озона на территории Москвы анализируется по осредненным данным измерений на АСКЗА «Мосэкомониторинга» двух типов: на 7 АСКЗА городского типа и 4 приагистральных АСКЗА (<https://mosecom.mos.ru/vozdux/>), при этом максимальные концентрации озона представлены наибольшими зафиксированными на всех АСКЗА осредненными за час концентрациями.

Следует отметить, что 2021 г., как и предыдущие полугодие обзоры в 2020 г. [29, 30], совпал с периодом пандемии коронавируса и, следовательно, может отражать результаты локдауна. Из данных метаанализа, проведенного в [31–33] по результатам мониторинга на десятках станций в различных точках земного шара, следует, что уменьшение выбросов основных примесей, как правило, сопровождалось ростом концентрации озона в приземном слое воздуха. При этом интересно, что в свободной тропосфере произошло уменьшение его концентрации за время пандемии [34, 35]. Отдельной задачи по отражению последствий локдауна в обзоре не ставилось, так как для этого необходимо иметь данные за предыдущие годы. А таких данных на ряде станций нет. Проверку же изменений концентраций озона в свободной тропосфере сделаем по результатам самолетного зондирования.

## 1. Новые станции и используемые приборы

Полный перечень станций и оборудования, установленного на них, а также описание режима работы и калибровок были даны в предыдущих обзорах [29, 30]. В 2021 г. были возобновлены измерения на ст. Слюдянка и Таруса, открыты новые станции ОПТЭК – Карелия и пос. Боярский в Бурятии. В этом разделе дается их описание.

Станция атмосферного мониторинга Листвянка (51°50'48" с.ш., 104°53'58" в.д., 670 м н.у.м.) расположена в Иркутской обл. на юго-западном побережье оз. Байкал, в районе Истока р. Ангары,

на вершине прибрежного холма (200 м над уровнем озера) на территории Астрофизической обсерватории ИСЗФ СО АН РАН. Ближайший населенный пункт – пос. Листвянка – находится в 2 км от станции на берегу озера. Расположение станции на вершине холма позволяет избежать влияния местных источников загрязнения атмосферы (поселка, автотранспорта) и отслеживать региональные переносы загрязнений, главным образом со стороны Иркутска, Ангарска, Шелехова. На станции в непрерывном режиме круглогодично работает комплекс автоматических газоанализаторов, отслеживающих наличие в атмосфере различных примесей, включая озон. В феврале 2021 г. на станции установлен новый оптический анализатор озона Ф-105 (ОПТЭК, Санкт-Петербург, Россия). С 2001 г. станция вошла в международную программу «Сеть станций мониторинга кислотных выпадений в Восточной Азии – ЕАНЕТ». Планируется вывод данных в Интернет.

Летом 2021 г. в г. Таруса Калужской обл. под эгидой РУДН-ИОФ РАН начала работу автоматическая станция мониторинга приземного озона и основных метеопараметров. Станция расположена на территории Тарусского филиала Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН (54°43'36" с.ш., 37°10'40" в.д., 128 м н.у.м.), находящегося в центре города в зоне жилой застройки в 350 м от берега р. Оки. Таруса расположена на 110 км южнее Москвы на высоком берегу излучины Оки, с севера окружена сосновыми лесами. Население города составляет чуть более 9 тыс. чел. Поскольку в Тарусе отсутствуют промышленные предприятия, город и его окрестности считаются одним из курортных районов в дальнем Подмосковье. Основные местные источники антропогенного загрязнения атмосферы – автотранспорт и коммунальное хозяйство города. Ближайшая оживленная автотрасса Серпухов – Калуга проходит в 1,5 км от центра Тарусы. Расстояние до ближайших более крупных городов: Серпухов – ~30 км, Калуга – ~70 км, Тула – ~80 км. Станция мониторинга оснащена хемолюминесцентным анализатором озона 3.02П-А (ОПТЭК) с чувствительностью ~1 мкг/м<sup>3</sup>. Пробоотбор осуществляется при помощи тефлоновых трубок на высоте 5 м от поверхности земли. Измерения проводятся в режиме непрерывного долговременного мониторинга. Текущие значения измеряемых параметров регистрируются раз в минуту, далее производится их усреднение за 20 мин и результат сохраняется в базе данных.

Станция атмосферного мониторинга ОПТЭК-Карелия находится в пос. Волома (63°44'41" с.ш., и 31°56'33" в.д., 185 м н.у.м.) в северной части Республики Карелия, примерно в 80 км от границы с Финляндией (район Крайнего Севера России). Поселок расположен в низине, окруженной холмами высотой до 100 м. За границей населенного пункта присутствуют большие лесные массивы, а также сотни малых озер. Средняя температура воздуха зимой составляет –28 °С, летом – +25 °С. Самая низкая наблюдаемая температура зимой достигает –50 °С, самая высокая летом – +40 °С. Направление ветров

в месте расположения станции преимущественно Ю–З, скорость – 2–3 м/с. Среднегодовое давление не превышает 738–740 мм рт. ст. Средняя высота снежного покрова – 1,2–1,5 м. Крупных промышленных предприятий в регионе нет, ближайшее – Сеgezский целлюлозно-бумажный комбинат (ЦБК) – расположено на расстоянии 110 км, и Костомукшский горно-обогатительный комбинат – 114 км. Весьма редко, при сильном ветре, ощущается неприятный запах от переработки целлюлозы от Сеgezского ЦБК. Небольшое промышленное предприятие в поселке – это цех по производству и сушке древесины. В силу специфики орографии расположения поселка и преобладающего типа антициклональной погоды главным образом зимой наблюдаются температурные инверсии в атмосфере. Это приводит к значительному накоплению загрязняющих веществ ( $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ ) в приземном слое воздуха. Так, средняя концентрация летом  $\text{CO}$  – 200  $\text{мкг/м}^3$ ,  $\text{CO}_2$  – 400  $\text{мг/м}^3$ , зимой  $\text{CO}$  – 800  $\text{мкг/м}^3$ ,  $\text{CO}_2$  – 1200  $\text{мг/м}^3$ . Накопление окислов углерода в приземном слое воздуха, вероятно, связано со спецификой используемого в поселке топлива: в местной котельной и частных домах используются дровяные печи. Станция ОПТЭК-Карелия работает с мая 2021 г. в режиме опытной эксплуатации, содержит каналы измерения концентраций  $\text{O}_3$  (озона),  $\text{CO}$  (оксида углерода),  $\text{CO}_2$  (углекислого газа) и  $^1\Delta g(\text{O}_2)$  синглетного кислорода. Приземные концентрации озона и синглетного кислорода измеряются отечественными твердотельными хемилуминесцентными анализаторами мод. 3.02П-А и мод. 102-А соответственно. Предел основной погрешности измерения анализатора 3.02П-А для диапазона 0–30  $\text{мкг/м}^3$  составляет  $\pm 20\%$ , для 30–50  $\text{мкг/м}^3$  относительная погрешность –  $\pm 20\%$ . Предел основной погрешности измерения анализатора 102-А

для диапазона 0–10  $\text{мкг/м}^3$  –  $\pm 20\%$ , а относительная погрешность для 10–200  $\text{мкг/м}^3$  –  $\pm 20\%$ .

Станция «Боярский» расположена на юго-восточном побережье оз. Байкал в 160 км от г. Улан-Удэ. Для этого района характерны большие контрасты температур между озером и прилегающей территорией, которые усиливаются за счет закрытого положения Байкала, окруженного со всех сторон горными хребтами. Температурный градиент между озерной впадиной и сопредельными сухими котловинами, достигающий 20 °С и более, является одним из основных факторов образования и развития внутрикотловинной циркуляции и ее распространения на акваторию озера, что часто способствует накоплению атмосферных примесей. Можно считать, что с. Боярск слабо подвержено антропогенному воздействию: некоторое влияние могут оказывать небольшие промышленные центры (г. Бабушкин (22 км), пос. Каменск (50 км), пос. Селенгинск (60 км) и др.). В непосредственной близости от станции имеется смешанный лес (береза, сосна, кедр). Измерения концентрации приземного озона проводились хемилуминесцентными газоанализаторами 3.02 П-А. Калибровка осуществлялась с помощью калибратора Mod. 8500 Monitor Labs. Наблюдения на ст. «Боярский» были эпизодическими, в период экспедиционных работ (13–18 апреля и 21 июля – 20 августа 2021 г.).

## 2. Результаты измерений

### 2.1. Среднегодовые данные

Данные о среднегодовых концентрациях озона в приземном слое воздуха на всех станциях, проводивших измерения в 2021 г., приведены на рис. 1.

Рис. 1, с одной стороны, показывает, что на всех станциях среднегодовая концентрация озона

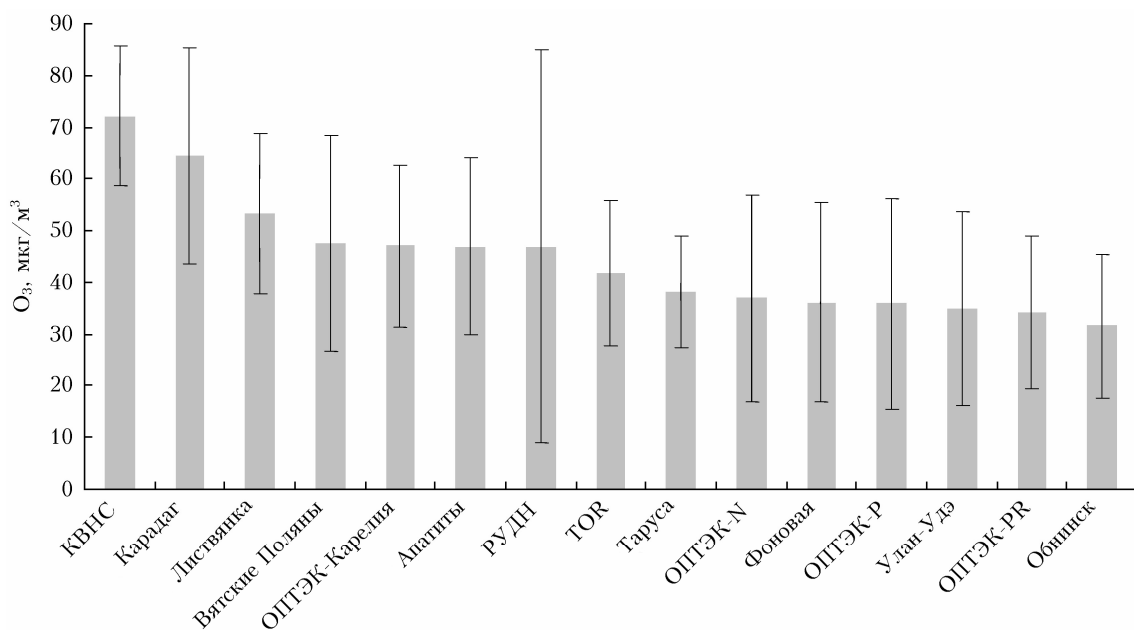


Рис. 1. Среднегодовые концентрации озона на российских станциях

выше  $30 \text{ мкг/м}^3$ . Это даже больше среднесуточной предельно допустимой концентрации (ПДК<sub>с.с.</sub>), что свидетельствует о превышении норматива в течение всего года [7].

С другой стороны, по величине среднегодового содержания станции ранжированы достаточно сложным образом. Наибольшие концентрации наблюдаются на Кисловодской горной станции, в Карадаге и Листвянке – в местах, удаленных от антропогенных источников прекурсоров озона. Наименьшая – в Обнинске, станция которого относится к городским условиям, где возможна гибель озона в выбросах предприятий или выхлопах автотранспорта. В группу станций со средними значениями концентраций озона попадают как фоновые (Вятские Поляны, ОПТЭК-Карелия), так и городские (РУДН) и пригородные (ТОР-станция). Подобным образом сочетаются станции и в группе с минимальными значениями. Здесь присутствуют городские (ОПТЭК-Н, Р, PR, Улан-Удэ, Обнинск), пригородные (Таруса) и фоновые (обсерватория «Фоновая») станции.

Из рис. 1 также следует, что для среднегодовых значений отсутствует какая-либо долготная или широтная зависимость. Возможно, здесь нашло свое отражение действие местных источников предшественников озона и антропогенных факторов. А возможно – многолетняя межгодовая изменчивость концентрации озона, когда среднегодовая концентрация может изменяться до четырех раз [36]. Для ответа на этот вопрос требуется отдельное исследование.

## 2.2. Годовой ход концентрации озона

Изменение концентрации озона на станциях, которые работали в течение всего года, рассмотрим по среднемесячным данным (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что на семи станциях (ТОР, «Фоновая», Листвянка, Обнинск, Апатиты, Вятские Поляны, Улан-Удэ), относящихся, как правило, к фоновым или пригородным, основной максимум концентрации в годовом ходе наблюдается весной. Весенний максимум концентрации зафиксирован также в ряде других мест [37–39]. В Томске, по результатам 20-летнего мониторинга, весенний максимум наблюдался в 88,5% случаев [40]. Его особенность в том, что он не совпадает с максимумом прихода солнечной радиации. Это, учитывая фотохимическую природу образования озона, пока необъяснимо [41]. В Улан-Удэ, по результатам 11-летнего мониторинга, весенний максимум наблюдался в 27,3% случаев [42].

С учетом того, что в фоновых районах органические газы могут составлять более половины исходного объема прекурсоров озона [43, 44], более вероятным видится механизм, связанный с усилением вегетационной активности растительности весной, которая поставляет органические газы – предшественники озона [45, 46].

Для станций, расположенных в Санкт-Петербурге и Москве (ОПТЭК-Н, ОПТЭК-Р и РУДН), основной максимум концентрации озона в 2021 г.

наблюдался в июле в условиях блокирующего антициклона и связанной с крупномасштабной циркуляцией аномально жаркой сухой погоды. Климатический же годовой максимум приземного озона в умеренных широтах, в том числе в Томске и Москве, наблюдается обычно весной (апрель-май). Это недавно проиллюстрировано результатами анализа данных непрерывного мониторинга за период 2005–2020 гг. в [47]. В мегаполисах южных широт максимум озона наблюдается в июле за счет его фотохимической генерации из антропогенных выбросов [48, 49].

На станции ОПТЭК-PR имеется два максимума концентрации. Первый, не основной, зафиксирован в весенне-летний период, второй – в декабре. Пока сложно объяснить этот факт. Возможно, он связан с какими-то локальными источниками поступления газов-предшественников озона, поскольку на остальных станциях в Санкт-Петербурге повышения концентрации в этот период не зафиксировано.

Особенный годовой ход наблюдается на высокогорной станции КВНС (рис. 2). Обычно повышенные среднемесячные значения на КВНС отмечаются весной (в марте – мае) и летом (в июле-августе) и не совпадают с максимумом продолжительности солнечного сияния [50]. Этот регулярный эффект наблюдался и подтверждался с начала измерений приземного озона на КВНС в 1989 г. Весенний локальный максимум проявляется и на других высокогорных станциях, например, на Юнгфрауйох (JFJ), где кроме фотохимических процессов на режим озона оказывают влияние стратосферно-тропосферный обмен и горно-долинная циркуляция. Минимум концентрации озона на КВНС приходится на осень-зиму. Абсолютный среднечасовой максимум 2021 г. ( $140 \text{ мкг/м}^3$ ) наблюдался 19 июля; 13 и 18 августа среднечасовые значения достигали  $120 \text{ мкг/м}^3$ . В условиях высокогорья такие высокие концентрации озона на КВНС могут быть связаны со стратосферными вторжениями в свободную тропосферу и последующим перемешиванием в зоне орографических возмущений, в частности при образовании фена [51]. Как правило, такие события имеют небольшую продолжительность – от одного до нескольких часов. Повышенные концентрации могут также быть связаны с генерацией озона в загрязненном воздухе при дальнем переносе.

Для рассмотрения вклада дальнего переноса в наблюдаемые экстремальные значения был выполнен траекторный анализ приходивших на КВНС воздушных масс. Методика расчета 7-суточных обратных траекторий описана в обзоре [30]. Из-за пропусков в измерениях 2021 г. по техническим причинам было смоделировано меньше траекторий, чем в 2020 г., – ~17000. В отличие от городских условий, где падение концентрации озона до очень низких значений – признак сильного загрязнения окислами азота, на КВНС, расположенной в чистой местности и над пограничным слоем атмосферы, аномально низкие концентрации озона связаны не столько с дальним переносом, сколько с сухим осаждением на земную поверхность. Наиболее активно

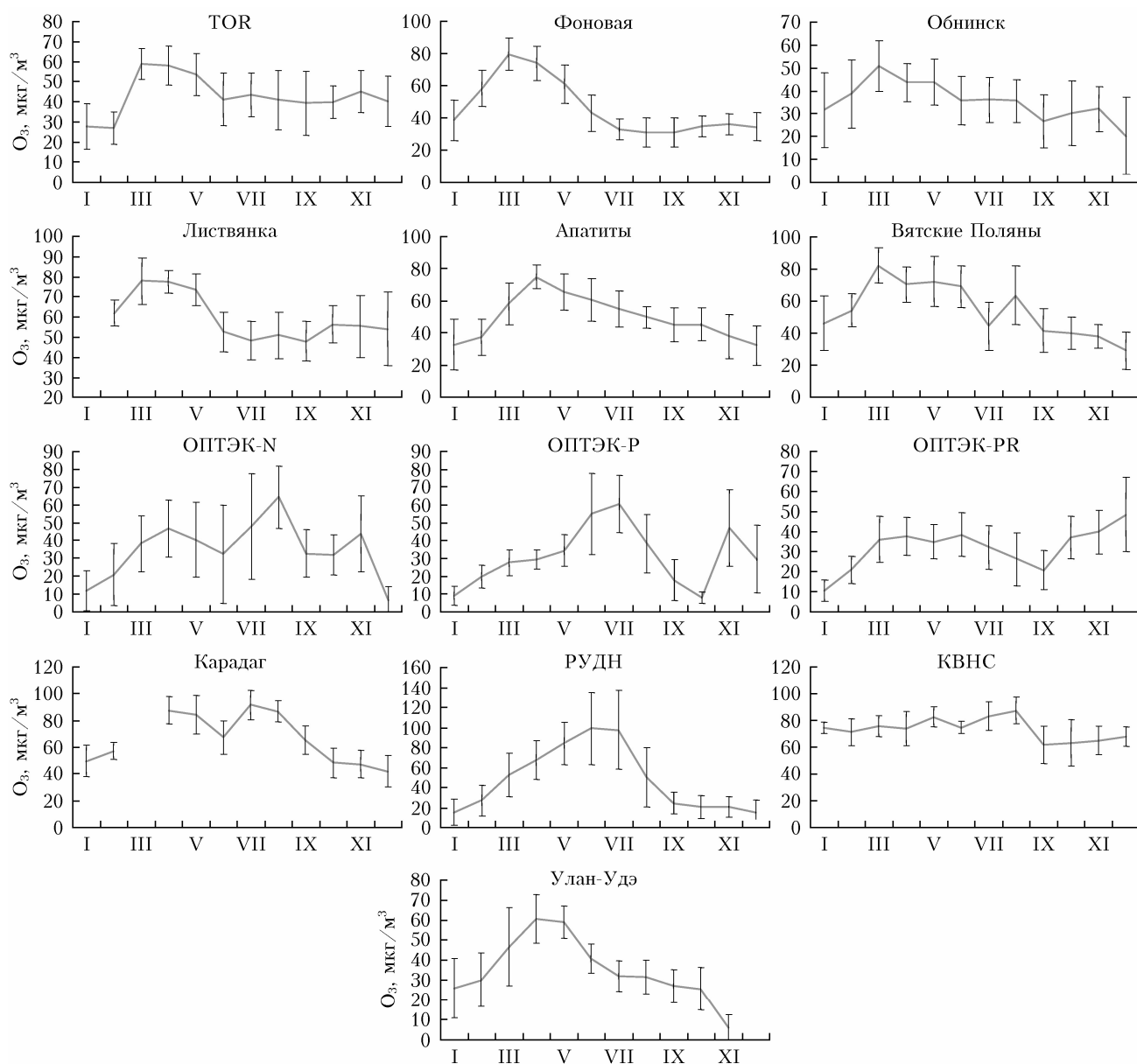


Рис. 2. Годовой ход концентрации озона на российских станциях по среднемесячным данным

этот процесс идет в малоподвижной воздушной массе, когда контакт анализируемого воздуха с покрытой растительностью поверхностью наиболее продолжительный. Влияние переноса загрязнений с нижних уровней со стороны Кисловодска (750–850 м н.у.м.) в дни с условиями, благоприятными для развития горнодолинной циркуляции, как было показано в [50], приводит, наоборот, к увеличению дневного максимума озона, но очень незначительному. Кроме того, снижению концентрации озона способствуют туманы. В связи с этим мы исключили из анализа обратные траектории для дней, характеризующихся высокой влажностью (более 80%) в конечной точке траектории на КВНС. В результате в массиве оказалось ~13000 траекторий. Из этого массива было отобрано два набора траекторий, соответствующих экстремальным отрицательным

и экстремальным положительным аномалиям озона, соответственно, первого и последнего децилей функции распределения аномалий озона, рассчитанных относительно аппроксимирующего полинома 2-й степени. Для экстремальных значений аномалий концентрации озона обоих знаков были восстановлены поля вероятности  $P$  (%) переноса воздушных частиц к КВНС в пространственных ячейках размером  $1^\circ \times 1^\circ$  (рис. 3, цв. вкладка).

Полученные результаты в целом схожи с наблюдениями 2020 г.: экстремально высокие аномалии приземного озона на КВНС в 2020 г. были связаны с переносом воздуха с южных направлений, экстремально низкие значения – с переносом воздуха с северо-западных направлений. В случае экстремально высоких аномалий в 2021 г. по сравнению с 2020 г. добавилось юго-восточное направление:

воздушные частицы, связанные с экстремально высокими аномалиями озона в 2021 г., с наибольшей вероятностью перемещались не только над Турцией, как в 2020 г., но также и над Азербайджаном, Южным Каспием, Туркменистаном и Узбекистаном. Траектории, связанные с экстремально низкими приземными концентрациями в 2021 г., как и в 2020 г., с наибольшей вероятностью проходили над Краснодарским краем, Азовским морем и украинским Приазовьем. То есть в структуре массива траекторий ярко выделяются два кластера: один обусловлен приходом воздушных масс с Ближнего Востока, а другой, восточный, имеет структуру, близкую к зональной. И те, и другие траектории проходят через районы интенсивной добычи и переработки нефти и газа. Если рассмотреть сезонное распределение экстремальных значений озона, то видно, что максимальные концентрации преобладают в весенне-летний сезон, когда имеет место устойчивый восточный перенос, вызванный среднеазиатским антициклоном. В условиях высоких температур и солнечной освещенности окисление летучих органических соединений в шлейфе предприятий нефтегазовой индустрии приводит к активной генерации озона и стабильному увеличению концентрации озона на КВНС.

### **2.3. Динамика среднесуточных концентраций**

Одна из нормируемых характеристик содержания озона в воздухе — его среднесуточная концентрация, которая не должна превышать  $30 \text{ мкг/м}^3$  [7]. Данные по ней представлены на рис. 4 (цв. вкладка).

Из рис. 4 видно, что значительную часть года среднесуточная ПДК озона превышена во всех пунктах измерений. Ниже будет дана цифровая информация об этом. На ряде станций имеет место двукратное и даже трехкратное превышение ПДК. На городских станциях наблюдаются отдельные дни или непродолжительные периоды, как правило, осенью и зимой, когда среднесуточная концентрация озона уменьшается до нуля. По-видимому, это обусловлено низкой скоростью фотохимического образования озона в такие периоды и его гибелью в выбросах примесей от автомобилей.

### **2.4. Максимальные за сутки концентрации**

Еще одна нормируемая характеристика — максимальная за час концентрация озона. Согласно [7] она не должна превышать  $160 \text{ мкг/м}^3$ . Эти данные собраны на рис. 5 (цв. вкладка).

Из рис. 5 следует, что на 9 из 14 станций в 2021 г. максимальная разовая ПДК не была превышена. На четырех отмечалось однократное превышение ПДК<sub>м.р.</sub> В Москве, на станции РУДН, было зафиксировано трехкратное превышение. Это уже можно считать фотохимическим смогом.

Таким образом, в Московском регионе режим приземного озона в 2021 г. отличался от предыду-

щих лет. Во-первых, рекордными и ранее не наблюдавшимися величинами концентрации. Во-вторых, количеством озоновых эпизодов с превышением российских нормативов. В-третьих, образованием летнего максимума, ставшего главным в годовом ходе приземного озона [52–54]. Это заметно отличается от данных предыдущих обзоров [29, 30]. В 2020 г. дождливая и более холодная, чем обычно, погода в Москве сопровождалась пониженными концентрациями озона, слабовыраженным весенним максимумом и отсутствием летнего максимума. В апреле – августе 2021 г. в центральных областях России особенности крупномасштабной циркуляции обусловили положительную аномалию температуры воздуха в теплый период. По данным сайта <https://meteoinfo.ru/>, в Москве погода весной была теплее обычной на  $1\text{--}2^\circ$ , летом — на  $3\text{--}4^\circ$ . В летние месяцы 31 день температура приземного воздуха поднималась днем выше  $+30^\circ$ , из них 15 дней — до  $33\text{--}36^\circ$ . Жаркая сухая погода благоприятствует интенсивной фотохимической генерации озона [55–57]. Именно аномальные погодные условия создали предпосылки для формирования летом экстремально высоких уровней приземного озона.

Весенний максимум приземного озона в Москве наблюдался в апреле-мае, часовые концентрации приземного озона на АСКЗА «Мосэкомониторинг» повышались в отдельные дни до  $130\text{--}150 \text{ мкг/м}^3$ . Продолжительный весенний максимум в 2021 г. определялся особенностями своего формирования.

Летние озоновые эпизоды не имеют аналогов за всю историю регулярных наблюдений озона в Москве [47]. В 2002 и 2010 гг. в периоды влияния на уровень озона дыма от лесных пожаров высокие концентрации формировались в конце июля — начале августа под влиянием дальнего переноса озона и его предшественников от удаленных источников (см., например, [54]). В 2021 г. основным фактором аномального роста концентраций приземного озона стало интенсивное фотохимическое образование озона в загрязненном местными источниками воздухе в условиях ослабления атмосферной циркуляции в блокирующих антициклонах.

Наиболее продолжительный озоновый эпизод с экстремальными величинами приземной концентрации наблюдался во второй половине июня в условиях самой высокой в году УФ-облученности. Двухнедельная волна тепла в июне (с 14 июня температура воздуха в послеполуденные часы поднималась выше  $+25^\circ$ ) сопровождалась мощными радиационными инверсиями, слабым переносом в нижних слоях атмосферы и достигла апогея в двадцатых числах месяца. Как показано на рис. 6 (цв. вкладка), восемь дней приземная концентрация озона на отдельных АСКЗА превышала российский норматив (ПДК<sub>м.р.</sub>) в  $1,2\text{--}1,6$  раза, в дни с экстремально высоким загрязнением — в  $1,8$  (13 июля) и в  $2,2$  раза (23 июня).

С помощью траекторного анализа установлено, что формирование экстремально высоких концентраций озона происходило в циркулировавшей в центре антициклона над Московской агломерацией воздушной массе, что способствовало наполнению ее

загрязняющими веществами. В этот период наблюдалась максимальная суточная динамика. После ночного разрушения/стока озона до 10–20 мкг·м<sup>-3</sup> в утренние часы (с 8:00 до 12:00) происходило очень быстрое нарастание концентраций до 100–150 мкг/м<sup>3</sup> и более. Процесс сопровождался резким уменьшением в воздухе концентрации оксидов азота. Заметим при этом, что максимальное в эпизоде увеличение приземной концентрации озона 23 июня совпало с наибольшим уровнем NO<sub>2</sub>, что характерно для фотохимических смогов [58–60].

Шлейфы загрязненного воздуха с высоким содержанием озона распространялись от Москвы на значительные расстояния; по расчетам химической транспортной модели SILAM (<https://www.ventusky.com/>) насыщенные озоном воздушные массы перемещались на соседние области, в частности в эпизоде максимального уровня озона в Москве 23 и 24 июня шлейф антропогенного озона переносился на северо-восток от Москвы – на Ивановскую, Владимирскую и частично Нижегородскую обл. (рис. 7, цв. вкладка).

В озоновых эпизодах поле приземного озона внутри мегаполиса характеризовалось высокой неоднородностью: разница между максимальными концентрациями на станциях городского и приагистрального типа достигала в отдельные дни 80–100 мкг/м<sup>3</sup> (рис. 6). Продолжительный озоновый эпизод закончился 28 июня после прохождения холодного атмосферного фронта и смены воздушных масс, а также затока чистого воздуха из Прибалтики.

Следующий озоновый эпизод произошел в Москве в июле. Он сформировался на фоне новой волны 30-градусной жары 7–18 июля и прерывался только 11 июля из-за кратковременного затока воздуха с севера. Как и в июньском эпизоде, максимальное повышение уровня озона в приземном воздухе наблюдалось в период с 15:00 до 17:00 при максимальном прогреве воздуха, влажности воздуха ~30% и штиле в нижних слоях атмосферы при нахождении над регионом малоподвижного антициклона. Как было показано в [61], низкая влажность воздуха также способствует увеличению концентрации озона. Имеет значение, что концентрации NO<sub>2</sub> ночью максимально увеличивались (до 100–120 мкг/м<sup>3</sup>) именно 8 и 13 июля, обеспечивая в утренние часы высокую химическую активность для дневной выработки озона, а вечером – для его разрушения. Также можно отметить, что уровень приземного озона 13 июля при температуре +35° оказался больше на ~50 мкг/м<sup>3</sup>, чем 8 июля при температуре +32° при почти одинаковых других атмосферных параметрах. Июльский озоновый эпизод закончился 19 июля благодаря смене синоптического процесса и приходу чистой воздушной массы из балтийского региона.

В августе в Москве наблюдались еще три короткие волны 30-градусной жары, но из-за отсутствия застойных синоптических ситуаций при этом и снижения уровня УФ-радиации эпизодов загрязнения воздуха озоном и его предшественниками не возникало, лишь на отдельных городских станциях

было зафиксировано нетипичное возрастание озона до 0,8–0,9 ПДК<sub>м.р.</sub>

Максимальные приземные концентрации озона (ПКО) в 2021 г. на СФЭМ «Карадаг» наблюдались 8 мая и 6 августа в ясные безветренные дни (150 и 141 мкг/м<sup>3</sup> соответственно), а минимальная – 17 декабря (6 мкг/м<sup>3</sup>), когда влажность воздуха составляла более 90%. В летний период максимальные суточные концентрации озона фиксировались при южном и юго-восточном направлениях ветра, что относительно расположения СФЭМ отражает перенос со стороны моря. Впервые за весь период наблюдений с 2006 г. был отмечен утренний максимум озона, он наблюдался 8 мая. В этот день было отмечено три пика ПКО, первый в 4:00, второй в 8:00 и третий в 20:00 (131, 150 и 116 мкг/м<sup>3</sup> соответственно). Предположительно ночные пики озона связаны с его стратосферным источником, а также с интенсивным вертикальным перемешиванием между приземным слоем и свободной тропосферой.

В табл. 1 собраны абсолютные максимумы концентраций озона по каждой из рассматриваемых станций.

Таблица 1  
Абсолютные максимумы среднесуточных концентраций озона в 2021 г. на российских станциях

Станция	Концентрация, мкг/м <sup>3</sup>
Москва, РУДН	490
Мосэкомониторинг (северо-запад)	358
Обнинск	253
ОПТЭК-Р	193
ОПТЭК-Н	172
Вятские Поляны	169
Боярский	151
Карадаг	150
КВНС	134
ТОР	129
Фоновая	127
ОПТЭК-Карелия	126
ОПТЭК-PR	116
Улан-Удэ	116
Листвянка	115
Апатиты	104
Таруса	92

### 3. Распределение озона в тропосфере

В ИОА СО РАН с июля 1997 г. по настоящее время выполняются ежемесячные полеты на самолете-лаборатории «Оптик» для определения вертикального распределения газового и аэрозольного составов. Вначале полеты производились на самолете Ан-30 [62], затем на Ту-134 [63]. Полеты самолета-лаборатории осуществляются над районом Караканского бора на расстоянии 100 км к юго-западу от Новосибирска для исключения вклада города. Взлет производится в полдень, когда происходит максимальная фотохимическая генерация озона, которая продолжается в течение 2 ч. Высотный диапазон составляет от 0 до 7 км. В 2021 г. из-за корона-



вируса не все полеты состоялись. Поскольку имеется проблема измерения озона в условиях, отклоняющихся от фоновых, которая ранее обсуждалась в [64, 65], то на борту одновременно работают три озонметра: хемилюминесцентный 3-02П и два ультрафиолетовых Модель-49С Thermo Environment Inc. (США). Озонотметры калибруются перед вылетом с помощью генератора озона ГС-2.

Данные измерений вертикального распределения озона, приведенные на рис. 8, показывают, что в холодный период (март), когда поверхность земли покрыта снегом, генерации озона в пограничном слое атмосферы не было. Она наблюдалась лишь в мае. Таким образом, основное поступление  $O_3$  происходило из стратосферы. Причем поток был не очень интенсивный, так как вертикальное распределение в средней тропосфере близко к нейтральному.

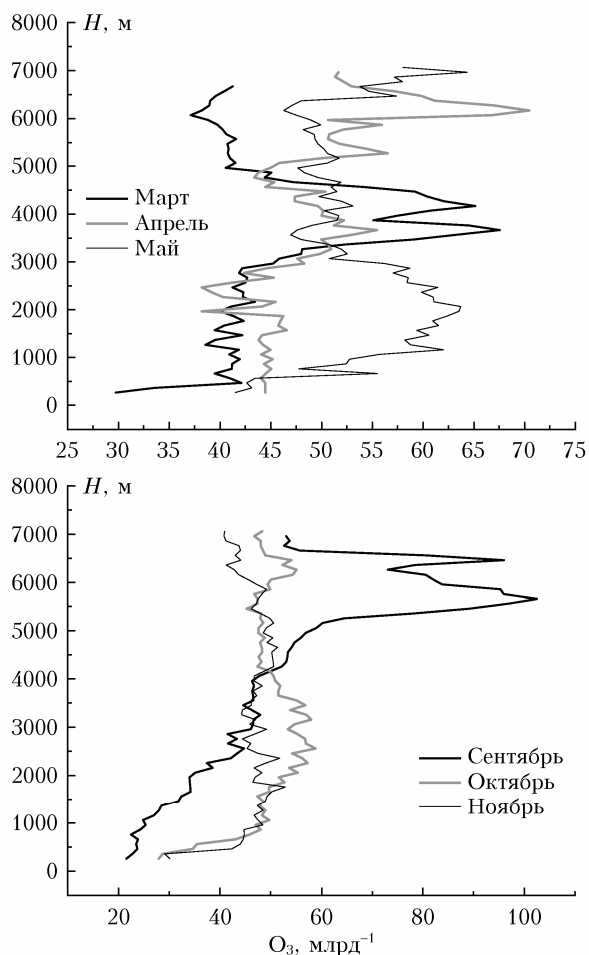


Рис. 8. Вертикальное распределение концентрации озона над Западной Сибирью в 2021 г.

Приведенные на рис. 8 данные существенно отличаются от результатов многолетнего зондирования, которые были ранее обобщены в [66] для этого же района. Отмечалось наличие почти постоянного фотохимического образования озона в приземном или пограничном слоях атмосферы, которое в 2021 г. зафиксировано только в апреле.

Для выявления и анализа тенденций изменения концентрации озона в тропосфере над Западной Сибирью, отмеченных в [34, 35], по данным многолетних измерений был построен рис. 9, где приведены среднегодовые концентрации озона на разных высотах.

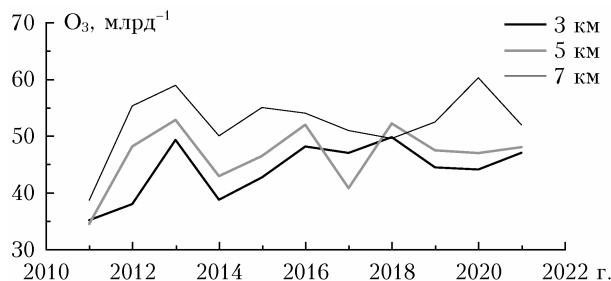


Рис. 9. Изменение концентрации озона на разных высотах над Западной Сибирью за 2011–2021 гг.

Из рис. 9 видно, что изменение концентрации озона в период эпидемии коронавируса небольшое и имеет разные знаки на высотах нижней и верхней тропосферы. Вариации лежат в пределах многолетней изменчивости концентрации озона на этих высотах.

#### 4. Соответствие гигиеническим нормативам

В Российской Федерации установлены следующие нормативы по концентрации озона в приземном слое воздуха [7]: ПДК<sub>с.с</sub> – 30 мкг/м<sup>3</sup>, ПДК<sub>м.р</sub> – 160 мкг/м<sup>3</sup>, предельно допустимая концентрация вредного вещества в воздухе рабочей зоны (ПДК<sub>р.з</sub>) – 100 мкг/м<sup>3</sup> на протяжении 8 ч.

В табл. 2 собраны случаи превышения перечисленных выше ПДК.

Из табл. 2 видно, что превышение ПДК<sub>с.с</sub> может наблюдаться во всех регионах, где проводился мониторинг. Если не брать в расчет КВНС как особую станцию, то повторяемость среднесуточных концентраций 30 мкг/м<sup>3</sup> и более лежит в пределах 23,5–97,1%. Концентрации 60 мкг/м<sup>3</sup> (2ПДК) и более также наблюдаются во всех районах и изменяются от 3,6 до 54,5%. В ряде районов фиксируется превышение ПДК рабочей зоны. В пяти районах имеется превышение ПДК<sub>м.р</sub>. Следует отметить, что две станции работали не весь 2021 г. Иначе нижние пределы повторяемости были бы выше. Особенно нужно отметить станцию РУДН, где зафиксировано 145 периодов длительностью более 8 ч, когда концентрация превышала 100 мкг/м<sup>3</sup>, и 402 случая часовых концентраций со значением 160 мкг/м<sup>3</sup> и более. По всем признакам в Москве несколько дней в послеполуденные часы наблюдался классический фотохимический смог. Отметим, что информация о содержании озона в приземном воздухе регулярно представляется в режиме онлайн на сайте ГПБУ «Мосэкомониторинг» (<https://mosecom.mos.ru/vozdux/>). Однако население мало осведомлено

**Превышение ПДК озона в приземном слое воздуха на территории России  
во втором полугодии 2021 г.**

Станция	ПДК <sub>с.с.</sub> (30 мкг/м <sup>3</sup> )			ПДК <sub>р.з.</sub> (100 мкг/м <sup>3</sup> )	ПДК <sub>м.р.</sub> (160 мкг/м <sup>3</sup> )
	1ПДК (дни/%)	2ПДК (дни/%)	3ПДК (дни/%)		
ОПТЭК-PR	179/53,4	12/3,6	0/0	0	0
ОПТЭК-Р	158/51,3	37/12,0	3/1,0	2	8
ОПТЭК-Н	191/57,5	37/11,1	3/0,9	0	2
ОПТЭК-Карелия	117/90,0	30/23,1	0	1	0
СФЭМ Карадаг	305/97,1	171/54,5	41/13,1	23	0
Обнинск	228/70,8	9/2,8	0/0	0	1
РУДН (Москва)	212/58,9	115/31,9	55/15,3	145	402
КВНС ИФА	239/99,2	205/85,1	19/7,9	2	0
Вятские Поляны	326/89,3	149/40,8	17/4,6	4	1
ТОР-станция	306/84,8	51/14,1	0	0	0
Фоновая	288/81,1	89/25,1	7/2,0	3	0
Листвянка	327/98,2	157/48,0	2/0,6	0	0
Апатиты	301/81,8	98/27,6	0	0	0
Таруса	36/23,5	5/3,3	0	0	0
Улан-Удэ	191/57,2	36/10,8	0	0	0
Боярский	1/1,4	26/38,2	7/10,3	7	0

об опасном воздействии озона на организм и правилах поведения в таких ситуациях. Отмеченное во многих СМИ увеличение заболеваемости объяснялось лишь высокими температурами воздуха в эти периоды.

### Заключение

Проведенный обзор показывает, что на территории России концентрация озона в приземном слое воздуха в 2021 г. во всех пунктах превышает отечественные гигиенические нормативы. Это требует проведения более полного анализа озonoобразующих веществ и разработки мероприятий по уменьшению их поступления в атмосферу.

Очевидна также мозаичность представленных в обзоре данных. Отсутствуют данные по многим крупным регионам страны. Это указывает на необходимость расширения числа городов и фоновых районов, где осуществлялся бы мониторинг озона.

Зафиксированная летом 2021 г. в Москве смоговая ситуация в условиях теплеющего климата может повториться в любой момент. Это указывает на необходимость усовершенствования системы информирования населения об опасном загрязнении атмосферного воздуха с учетом прогностических данных о концентрации озона, рассчитываемых на основе статистических и численных моделей.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность Департаменту природопользования и охраны окружающей среды города Москвы и лично Е.Г. Семутниковой за создание современной сравнимой с зарубежными системы мониторинга, за ее развитие и поддержание на современном уровне.

**Финансирование.** Для подготовки обзора использовались данные, полученные с помощью инфраструктуры ИОА СО РАН, включая ЦКП «Атмос-

фера», созданной и эксплуатируемой по госзаданию № 121031500342-0, при частичной финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-661), инфраструктуры ИФМ СО РАН, созданной и эксплуатируемой по государственному заданию № 121032500027-3, инфраструктуры КНС – ПЗ РАН филиала ФИЦ ИнБЮМ по государственному заданию № 121032300023-7, инфраструктуры ИФА РАН по государственному заданию № 129-2022-0012, инфраструктуры ЛИН СО РАН по государственному заданию № 0279-2021-0014.

### Список литературы

1. *Лунин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н.* Физическая химия озона. М.: МГУ, 1998. 480 с.
2. *Перов С.П., Хргиан А.Х.* Современные проблемы атмосферного озона. Л.: Гидрометеониздат, 1980. 288 с.
3. *Разумовский С.В., Зайков Г.Е.* Озон и его реакции с органическими соединениями (кинетика и механика). М.: Наука, 1974. 322 с.
4. *Филов В.А.* (ред.). Вредные химические вещества. Неорганические соединения V–VIII групп. Л.: Химия, 1989. 592 с.
5. *Белан Б.Д.* Озон в тропосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 488 с.
6. *Лазарев Н.В.* Справочник для химиков, инженеров и врачей. Вредные вещества в промышленности. Л.: Химия, 1971. 520 с.
7. *СанПиН 1.2.3685-21* Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: дата введения 28.01.2021. М.: Стандарт информ, 2021. 1142 с.
8. *Mauzerall D.L., Wang X.* Protecting agricultural crops from the effects of tropospheric ozone exposure: reconciling science and standard setting in the United States, Europe, and Asia // *Ann. Rev. Energy Environ.* 2001. N 26. P. 237–268.

9. *Air pollution takes a big bite out of Asia's grain crops* // Nature. 2022. V. 601, N 7894. P. 487.
10. *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.
11. *Anav A., De Marco A., Collalti A., Emberson L., Feng Z., Lombardozi 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.
12. *Altshuller A.P., Wartburg A.F.* The interaction of ozone with plastic metallic materials in a dynamic flow system // Intern. J. Air Water Pollut. 1961. V. 4, N 1–2. P. 70–78.
13. *Daubendick R.L., Calvert J.G.* The reaction of ozone with perfluorinated polyolefins // Environ. Lett. 1974. V. 6, N 4. P. 253–272.
14. *Screpani A., DeMarco A.* Corrosion on cultural heritage buildings in Italy: A role for ozone? // Environ. Pollut. 2009. V. 157, N 5. P. 1513–1520.
15. *Coleman B.K., Destailhats H., Hodgson A.T., Nazarov 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.
16. *Rice R.G.* Century 21 – pregnant with ozone // Ozone Sci. Engen. 2002. V. 24, N 1. P. 1–15.
17. *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. V. 20, N 18. P. 10937–10951.
18. *Air Pollution by Ozone in Europe in Summer 2004. Overview of Exceedances of EC Ozone Threshold Values during April–September 2004.* EEA Technical Report N 3. 2005. 34 p.
19. *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.
20. *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.
21. *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.
22. *Cao J., Qiu X., Liu Y., Yan X., Gao J., Peng L.* Identifying the dominant driver of elevated surface ozone concentration in North China plain during summertime 2012–2017 // Environ. Pollut. 2022. V. 300. P. 118912.
23. *Wu K., Wang Y., Qiao Y., Liu Y., Wang S., Yang X., Wang H., Lu Y., Zhang X., Lei Y.* Drivers of 2013–2020 ozone trends in the Sichuan Basin, China: Impacts of meteorology and precursor emission changes // Environ. Pollut. 2022. V. 300. P. 118914.
24. *Gao J., Li Y., Xie Z., Hue B., Wang L., Bao F., Fan S.* The impact of the aerosol reduction on the worsening ozone pollution over the Beijing–Tianjin–Hebei region via influencing photolysis rates // Sci. Total Environ. 2022. V. 821. P. 153197.
25. *Мосэкомониторинг* / ГПБУ «Мосэкомониторинг». М., 2022. URL: <https://mosecom.mos.ru> (дата обращения: 24.03.2022).
26. *Доклады о состоянии окружающей среды города Москвы* // Департамент природопользования и охраны окружающей среды г. Москвы. М., 2021. URL: <https://www.mos.ru/eco/documents/doklady/view/> (дата обращения: 24.03.2022).
27. *Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2020 год.* М.: Росгидромет, 2021. 205 с.
28. *Обзор фоновое состояние окружающей природной среды на территории стран СНГ за 2019 г.* / Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля. М.: Росгидромет, 2020. 100 с.
29. *Андреев В.В., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Еланский Н.Ф., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Постыляков О.В., Савкин Д.Е., Сеник И.А., Степанов Е.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В., Челибанов И.В., Челибанов В.П., Тихонов Н.А., Захарова С.А., Давыдова М.А.* Приземная концентрация озона на территории России в первом полугодии 2020 г. // Оптика атмосф. и океана. 2020. Т. 33, № 9. С. 710–721; *Андреев В.В., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Еланский Н.Ф., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Постыляков О.В., Савкин Д.Е., Сеник И.А., Степанов Е.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В., Челибанов И.В., 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; *Андреев В.В., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Еланский Н.Ф., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Постыляков О.В., Савкин Д.Е., Сеник И.А., Степанов Е.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В., Челибанов И.В., Челибанов В.П., Широков В.В., Шукуров К.А.* Приземная концентрация озона на территории России в первом полугодии 2020 г. // Оптика атмосф. и океана. 2020. Т. 33, N 6. P. 671–681.
30. *Андреев В.В., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Демин В.И., Еланский Н.Ф., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Постыляков О.В., Савкин Д.Е., Сеник И.А., Степанов Е.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В., Челибанов И.В., Челибанов В.П., Широков В.В., Шукуров К.А.* Приземная концентрация озона на территории России во втором полугодии 2020 г. // Оптика атмосф. и океана. 2021. Т. 34, № 4. С. 292–301; *Андреев В.В., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Еланский Н.Ф., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Постыляков О.В., Савкин Д.Е., Сеник И.А., Степанов Е.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В., Челибанов И.В., Челибанов В.П., Широков В.В., Шукуров К.А.* Surface ozone concentration over Russian territory in the first half of 2020 // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 6. P. 671–681.
31. *Андреев В.В., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Демин В.И., Еланский Н.Ф., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Постыляков О.В., Савкин Д.Е., Сеник И.А., Степанов Е.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В., Челибанов И.В., Челибанов В.П., Широков В.В., Шукуров К.А.* Surface ozone concentration in Russia in the second half of 2020 // Atmos. Ocean. Opt. 2021. V. 34, N 4. P. 347–356.
31. *Mertens M., Jöckel P., Matthes S., Nützel M., Volker Grewe V., Sausen R.* COVID-19 induced lower-tropospheric ozone changes // Environ. Res. Lett. 2021. V. 16, N 6. P. 064005.
32. *Adam M.G., Tran P.T.M., Balasubramanian R.* Air quality changes in cities during the COVID-19 lockdown: A critical review // Atmos. Res. 2021. V. 264. P. 105823.
33. *Yang M., Chen L., Msigwa G., Tang K.H.D., Pow-Seng Yap P.-S.* Implications of COVID-19 on global environmental pollution and carbon emissions with strategies for sustainability in the COVID-19 era // Sci. Total Environ. 2022. V. 809. P. 151657.

34. Steinbrecht W., Kubistin D., Plass-Dülmer C., Davies J., Tarasick D.W., von der Gathen P., Deckelmann H., Jepsen N., Kivi R., Lyall N., Palm M., Notholt J., Kois B., Oelsner P., Allaart M., Peters A., Gill M., Van Malderen R., Delcloo A.W., Sussmann R., Mahieu E., Servais C., Romanens G., Stübi R., Ancellet G., Godin-Beekmann S., Yamanouchi S., Strong K., Johnson B., Cullis P., Petropavlovskikh I., Hannigan J.W., Hernandez J.-L., Rodriguez A.D., Nakano T., Chouza F., Leblanc T., Torres C., Garcia O., Röhlings A.N., Schneider M., Blumenstock T., Tully M., Paton-Walsh C., Jones N., Querel R., Strahan S., Stauffer R.M., Thompson A.M., Inness A., Engelen R., Chang K.-L., Cooper O.R. COVID-19 crisis reduces free tropospheric ozone across the Northern hemisphere // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48, N 5. P. e2020GL091987.
35. Bouarar I., Gaubert B., Brasseur G.P., Steinbrecht W., Doumbia T., Tilmes S., Liu Y., Stavrakou T., Deroubaix A., Darras S., Granier C., Lacey F., Muller J.-F., Shi X., Elguindi N., Wang T. Ozone anomalies in the free troposphere during the COVID-19 pandemic // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48, N 16. P. e2021GL094204.
36. Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н. Многолетняя изменчивость озона и аэрозоля в районе Томска и оправдываемость прогноза их среднегодовых концентраций на десятилетие // *Оптика атмосфер. и океана.* 2010. Т. 23, № 9. С. 772–776.
37. Feister U., Warmbt W. Long-term surface ozone increase at Arcona // *Proc. Quadrennial Ozone Symposium*, Greece, 1980. P. 782–787.
38. Volz A., Kley D. Evaluation of the Montsouris series of ozone measurements made in the nineteenth century // *Nature.* 1988. V. 332, N 6161. P. 240–242.
39. Cartalis C., Varotsos C. Surface ozone in Athens, Greece, at the beginning and at the end of the twentieth century // *Atmos. Environ.* 1994. V. 28, N 1. P. 3–8.
40. Белан Б.Д., Савкин Д.Е., Толмачев Г.Н. Исследование связи снежного покрова и концентрации озона в приземном слое воздуха в районе г. Томска // *Оптика атмосфер. и океана.* 2018. Т. 31, № 8. С. 665–669.
41. Monks P.S. A review of the observations and origins of the spring ozone maximum // *Atmos. Environ.* 2000. V. 34, N 21. P. 3545–3561.
42. Заяханов А.С., Жамсуева Г.С., Цыдытов В.В., Бальжанов Т.С. Результаты мониторинга приземного озона в атмосфере г. Улан-Удэ // *Метеорол. и гидрол.* 2013. № 12. С. 76–84.
43. Исидоров В.А. Летучие выделения растений: состав, скорость эмиссии и экологическая роль. СПб.: Алга, 1994. 188 с.
44. Curci G., Beekmann M., Vautard R., Smiatek G., Steinbrecher R., Theloke J., Friedrich R. Modelling study of the impact of isoprene and terpene biogenic emissions on European ozone levels // *Atmos. Environ.* 2009. V. 43, N 7. P. 1444–1455.
45. Collins W.J., Sitch S., Boucher O. How vegetation impacts affect climate metrics for ozone precursors // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. P. D23308. DOI: 10.1029/2010JD014187.
46. Sadiq M., Tai A.P.K., Lombardozzi D., Martin M.V. Effects of ozone–vegetation coupling on surface ozone air quality via biogeochemical and meteorological feedbacks // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17, N 4. P. 3055–3066.
47. Еланский Н.Ф., Шилкин А.В., Пономарев Н.А., Захарова П.В., Качко М.Д., Поляков Т.И. Пространственно-временные вариации содержания загрязняющих примесей в воздушном бассейне Москвы и их эмиссии // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2022. Т. 58, № 1. С. 92–108.
48. Tan Z., Ma X., Lu K., Jiang M., Zou Q., Wang H., Zeng L., Zhang Y. Direct evidence of local photochemical production driven ozone episode in Beijing: A case study // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 800. P. 148868.
49. Liu X., Guo H., Zeng L., Lyu X., Wang Y., Zeren Y., Yang J., Zhang L., Zhao S., Li Y., Zhang G. Photochemical ozone pollution in five Chinese megacities in summer 2018 // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 801. P. 149603.
50. Сеник И.А., Еланский Н.Ф., Беликов И.Б., Лисицына Л.В., Галактионов В.В., Кортунова З.В. Основные закономерности временной изменчивости приземного озона на высотах 870 и 2070 м в районе г. Кисловодска // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2005. Т. 41, № 1. С. 78–91.
51. Shakina N.P., Ivanova A.R., Elansky N.F., Markova T.A. Transcontinental observations of surface ozone concentration in the TROICA experiments: 2. The effect of the stratosphere-troposphere exchange // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2001. V. 37, suppl. 1. P. S39–S48.
52. Борисов Д.В., Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А. Исследование сезонной и суточной изменчивости концентраций приземного озона // *Гидрометеорологическое исследование и прогнозы.* 2020. Т. 377, № 3. С. 122–135.
53. Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А. Содержание озона над территорией Российской Федерации в 2020 г. // *Метеорол. и гидрол.* 2021. № 2. С. 131–140.
54. Звягинцев А.М., Беликов И.Б., Егоров В.И., Еланский Н.Ф., Крученицкий Г.М., Кузнецова И.Н., Николаев А.Н., Обухова З.В., Скороход А.И. Положительные аномалии приземного озона в июле-августе 2002 г. в Москве и ее окрестностях // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2004. Т. 40, № 1. С. 78–89.
55. Белан Б.Д., Савкин Д.Е., Толмачев Г.Н. Зависимость образования озона в приземном слое от температуры воздуха // *Оптика атмосфер. 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.
56. Porter W.C., Heald C.L. The mechanisms and meteorological drivers of the summertime ozone–temperature relationship // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. V. 19, N 21. P. 13367–13381.
57. Ulpiani G., Ranzi G., Santamouris M. Local synergies and antagonisms between meteorological factors and air pollution: A 15-year comprehensive study in the Sydney region // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 788. P. 147783.
58. Platikanov S., Terrado M., Pay M.T., Soret A., Tauler R. Understanding temporal and spatial changes of O<sub>3</sub> or NO<sub>2</sub> concentrations combining multivariate data analysis methods and air quality transport models // *Sci. Total Environ.* 2022. V. 806. P. 150923.
59. Hossain M.S., Frey H.C., Louie P.K.K., Lau A.K.H. Combined effects of increased O<sub>3</sub> and reduced NO<sub>2</sub> concentrations on short-term air pollution health risks in Hong Kong // *Environ. Pollut.* 2021. V. 270. P. 116280.
60. Liu C., Shi K. A review on methodology in O<sub>3</sub>–NO<sub>x</sub>–VOC sensitivity study // *Environ. Pollut.* 2021. V. 291. P. 118149.
61. Белан Б.Д., Савкин Д.Е. Роль влажности в изменении приземной концентрации озона // *Оптика атмосфер. и океана.* 2019. Т. 32, № 5. С. 395–398; Belan B.D., Savkin D.E. The role of air humidity in variations

- of near-surface ozone concentration // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 5. P. 586–589.
62. Зуев В.Е., Белан Б.Д., Кабанов Д.М., Ковалевский В.К., Лукьянов О.Ю., Мелешкин В.Е., Микушев М.К., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Покровский Е.В., Сакерин С.М., Терпугова С.А., Тумаков А.Г., Шаманаев В.С., Щербатов А.И. Самолет-лаборатория АН-30 «Оптик-Э» для экологических исследований // *Оптика атмосфер. и океана.* 1992. Т. 5, № 10. С. 1012–1021.
63. Анохин Г.Г., Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Барсук В.Е., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов В.С., Морозов М.В., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Пестунов Д.А., Сиков Г.П., Симоненков Д.В., Синицын Д.С., Толмачев Г.Н., Филиппов Д.В., Фофонов А.В., Чернов Д.Г., Шаманаев В.С., Шмаргунов В.П. Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик» // *Оптика атмосфер. и океана.* 2011. Т. 24, № 9. С. 80–816.
64. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Краснов О.А., Ковалевский В.К., Пирогов В.А., Плотников А.П., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Сравнение ультрафиолетового и хемилюминесцентного озонметров // *Оптика атмосфер. и океана.* 2002. Т. 15, № 8. С. 723–726.
65. Dunlea E.J., Herndon S.C., Nelson D.D., Volkamer R.M., Lamb B.K., Allwine E.J., Grutter M., Ramos Villegas C.R., Marquez C., Blanco S., Cardenas B., Kolb C.E., Molina L.T., Molina M.J. Technical note: Evaluation of standard ultraviolet absorption ozone monitors in a polluted urban environment // *Atmos. Chem. Phys.* 2006. V. 6, N 10. P. 3163–3180.
66. Белан Б.Д., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Вертикальное распределение озона в тропосфере над югом Западной Сибири // *Оптика атмосфер. и океана.* 2010. Т. 23, № 9. С. 777–783; Belan B.D., Tolmachev G.N., Fofonov A.V. Vertical ozone distribution in troposphere above south regions of West Siberia // *Atmos. Ocean. Opt.* 2011. V. 24, N 2. P. 181–187.

V.V. Andreev, M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, S.B. Belan, D.K. Davydov, V.I. Demin, N.V. Dudorova, N.F. Elansky, G.S. Zhamsueva, A.S. Zayakhanov, G.A. Ivlev, A.V. Kozlov, L.V. Konovaltseva, S.N. Kotelnikov, I.N. Kuznetsova, V.A. Lapchenko, E.A. Lezina, V.A. Obolkin, O.V. Postilyakov, V.L. Potemkin, D.E. Savkin, I.A. Senik, E.V. Stepanov, G.N. Tolmachev, A.V. Fofonov, T.V. Khodzher, I.V. Chelibanov, V.P. Chelibanov, V.V. Shirotov, K.A. Shukurov. **Tropospheric ozone concentration in Russia in 2021.**

Ozone is one of the most toxic impurities in the troposphere. Therefore, it is recognized as the number one pollutant in most countries and its concentration is monitored. This work presents an overview of continuous measurements of the ozone content in the troposphere over Russia throughout 2021 carried out on an initiative basis at 17 stations in different Russian regions. The monitoring results showed that the daily mean ozone concentration exceeded the MPC<sub>dm</sub> at all observation sites during a significant part of the year. Two- and even three-fold excess over MPC<sub>dm</sub> was observed at a number of stations. At six stations, concentrations above the MPC<sub>s</sub> were recorded. This requires a more comprehensive analysis of the composition and concentration of ozone precursors and the development of measures to reduce their emission into the atmosphere.

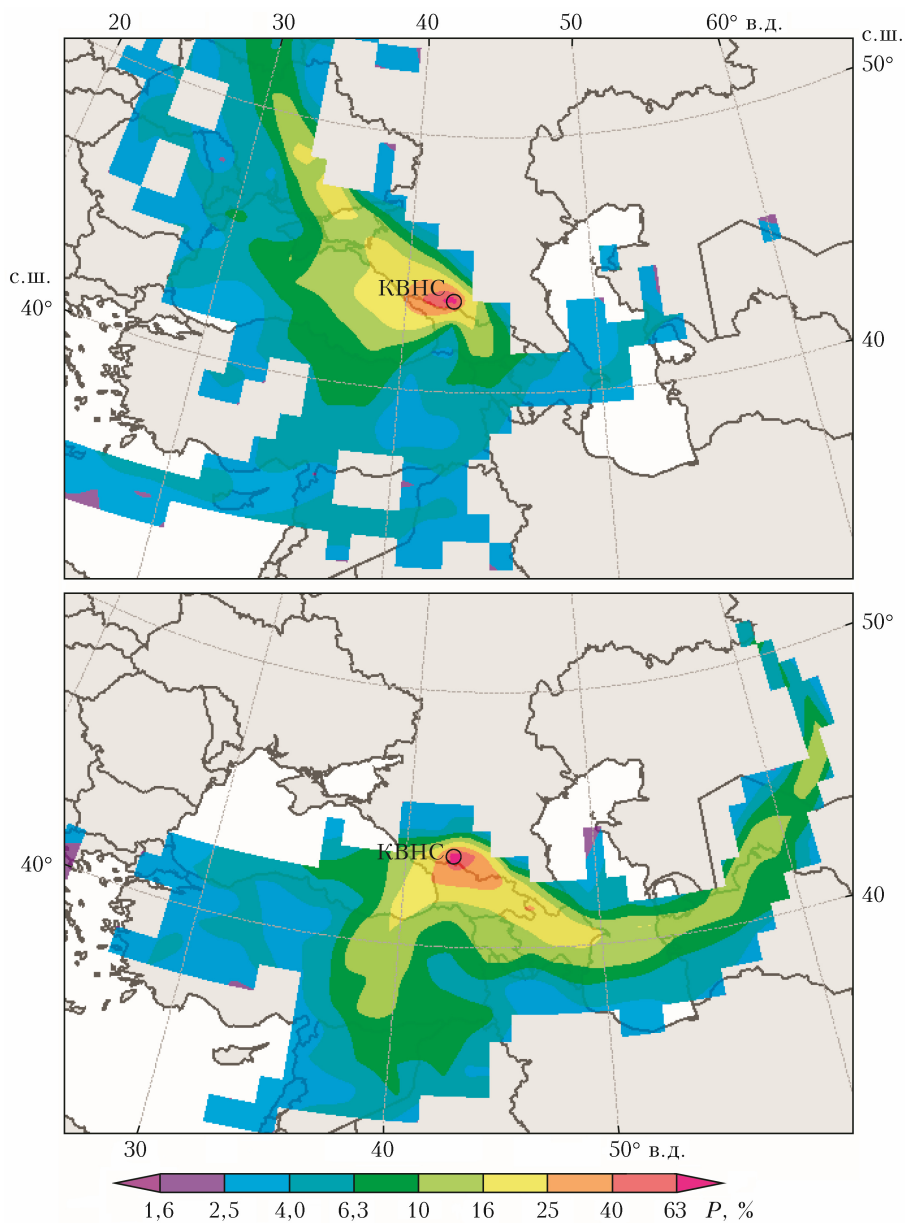


Рис. 3. Вероятность переноса воздушных частиц (элементарных воздушных масс), связанных с 10% самых низких (вверху) и 10% самых высоких (внизу) аномалий концентрации приземного озона на КВНС в 2021 г., над различными территориями

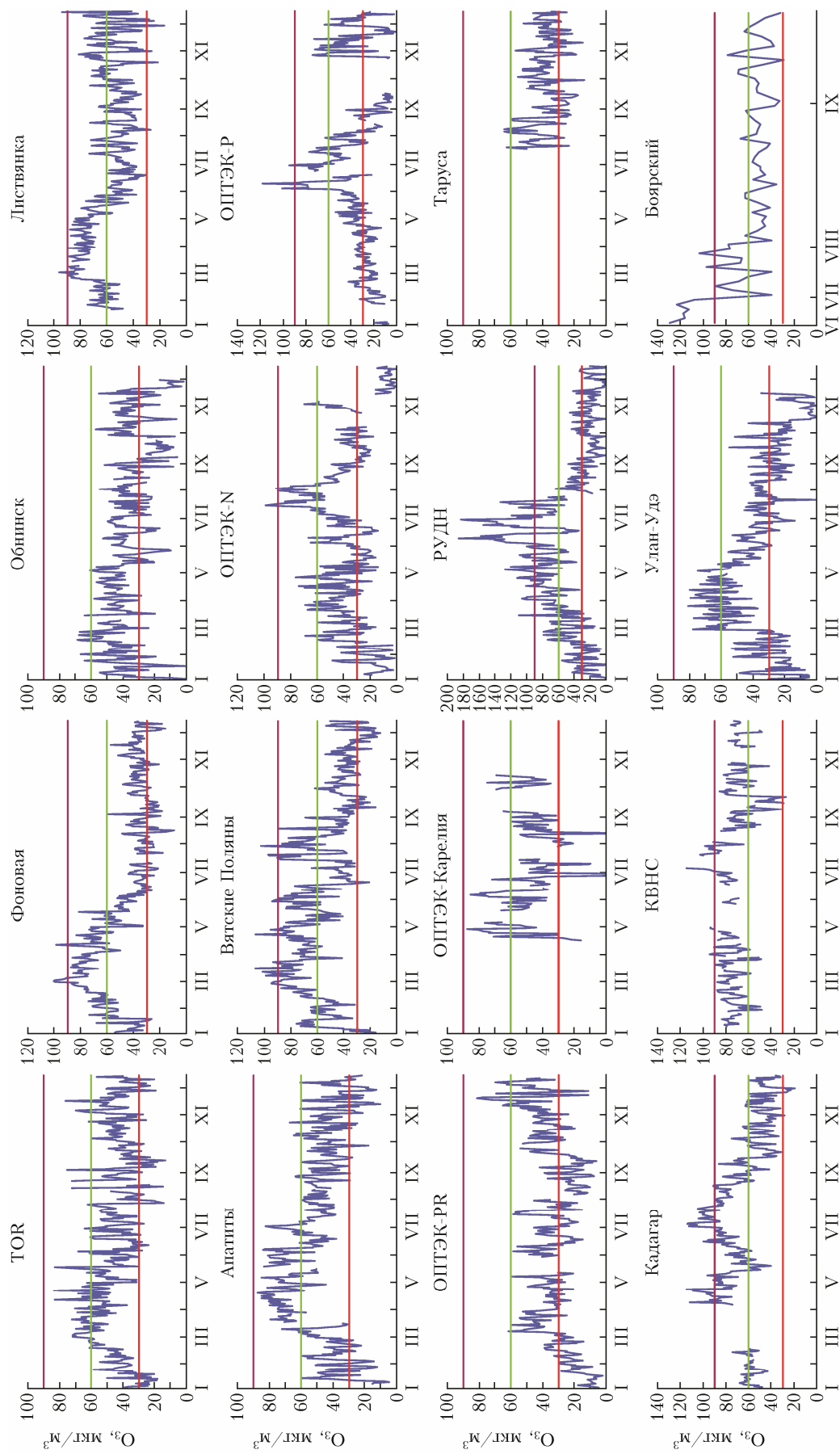


Рис. 4. Среднесуточные концентрации озона на российских станциях в 2021 г.; горизонтальные линии соответствуют 1ПДК (красная), 2ПДК (зеленая) и 3ПДК (синевая) (сгруппировано)

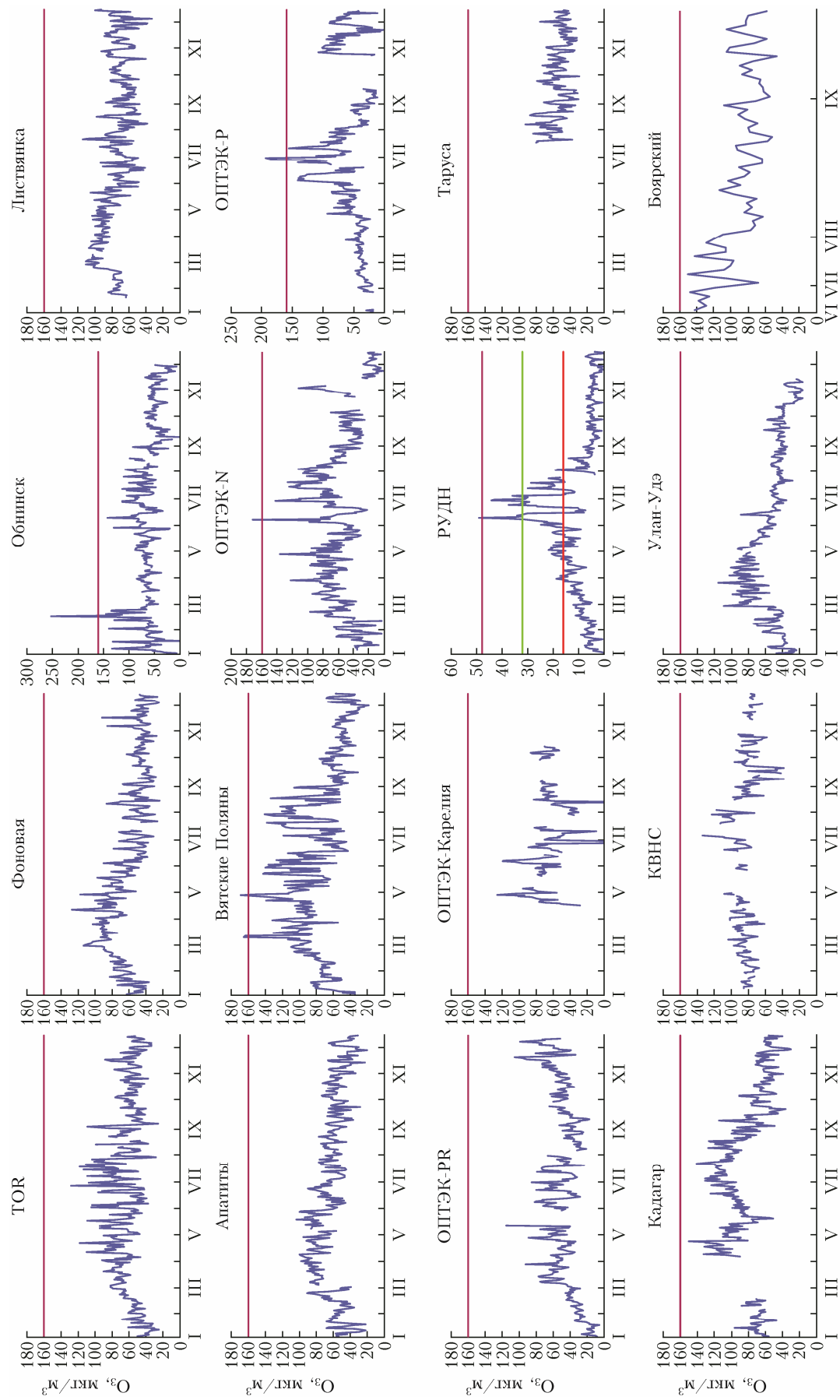


Рис. 5. Максимальные среднечасовые концентрации озона; красные горизонтальные линии соответствуют ПДК<sub>ср</sub>.



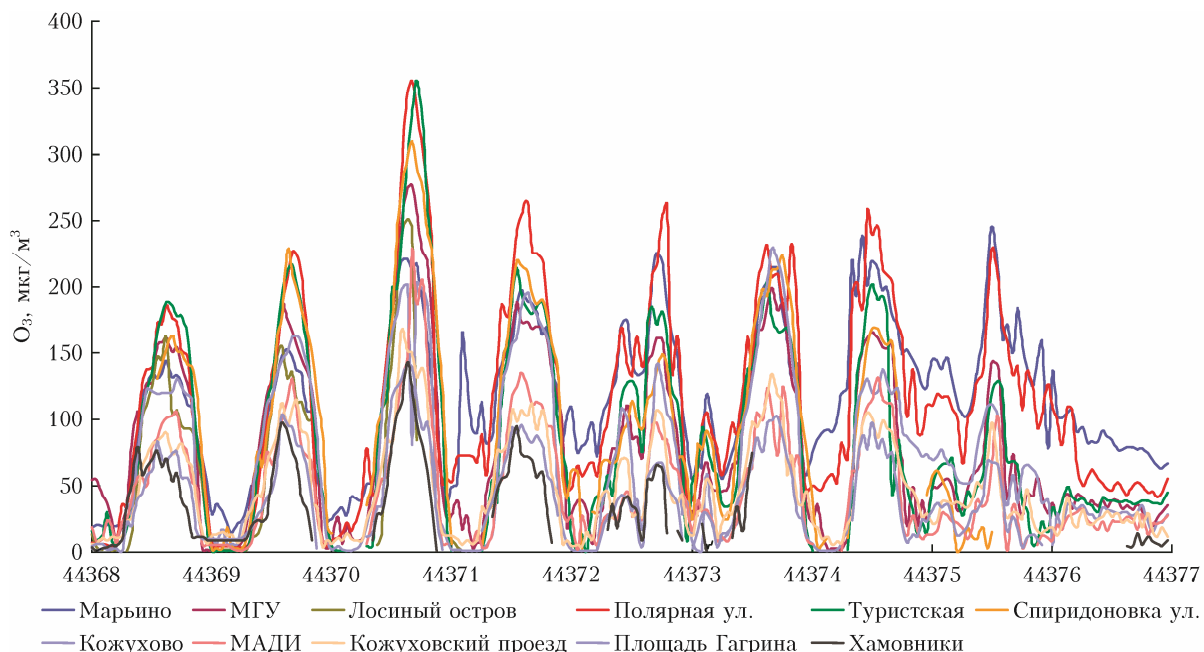
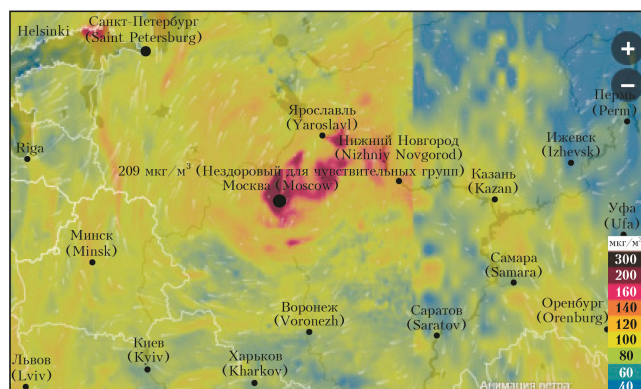
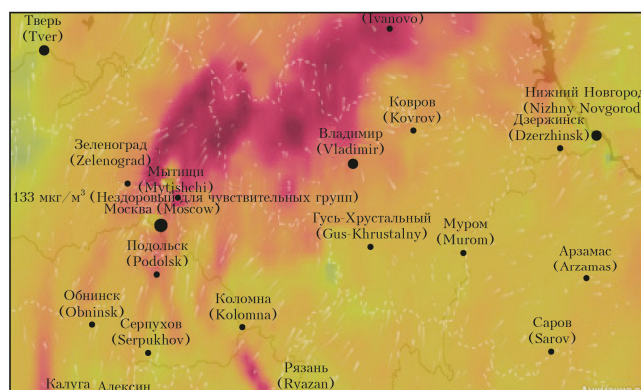


Рис. 6. Приземная концентрация озона на некоторых станциях Мосэкомониторинга в июне 2021 г.



*a*



*b*

Рис. 7. Концентрация приземного озона 23 (а) и 24 июня 2021 г. (б) по расчетам химической транспортной модели SILAM