

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.510.42

**Приземная концентрация озона на территории России
в первом полугодии 2020 г.**

**В.В. Андреев¹, М.Ю. Аршинов², Б.Д. Белан², Д.К. Давыдов²,
Н.Ф. Еланский³, Г.С. Жамсуева⁴, А.С. Заяханов⁴, Г.А. Ивлев²,
А.В. Козлов², С.Н. Котельников⁵, И.Н. Кузнецова⁶, В.А. Лапченко⁷,
Е.А. Лезина⁸, О.В. Постыляков³, Д.Е. Савкин², И.А. Сеник³,
Е.В. Степанов⁵, Г.Н. Толмачев², А.В. Фофонов², И.В. Челибанов⁹,
В.П. Челибанов⁹, В.В. Широтов^{10*}**

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

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

⁴Институт физического материаловедения СО РАН
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

⁵Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 38

⁶Гидрометцентр России
123242, г. Москва, Большой Предтеченский пер., 11–13

⁷Карадагская 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. Куротное, ул. Науки, 24

⁸Мосэкомониторинг
119019, г. Москва, ул. Новый Арбат, 11, стр. 1

⁹Приборостроительное предприятие «ОПТЭК»
199178, г. Санкт-Петербург, Малый проспект В.О., 58

¹⁰НПО «Тайфун»
249038, г. Обнинск Калужской обл., ул. Победы, 4

Поступила в редакцию 10.08.2020 г.

В обзоре приведены сведения о концентрации озона в приземном слое воздуха и тропосфере в первом полугодии 2020 г. Данные получены на 13 станциях, расположенных в разных регионах России; распределение по вертикали – с помощью самолета-лаборатории. Выполнена оценка превышения гигиенических нормативов, установленных в РФ. Показано, что среднесуточная предельно допустимая концентрация озона регулярно превышает на большинстве станций. На ряде станций имеются особенности в сезонном ходе, отличные от предыдущих лет.

Ключевые слова: атмосфера, вертикальный профиль, воздух, концентрация, озон, предельно допустимая концентрация, приземный слой, пограничный слой; atmosphere, vertical profile, air, concentration, ozone, maximum permissible concentration, surface layer, boundary layer.

Введение

Озон представляет собой вещество, по гигиеническим нормативам относящееся к первому классу

опасности. В приземном слое воздуха он взаимодействует с биологическими и созданными человеком объектами, проявляя свои токсические свойства. В больших концентрациях озон сильно угнетает жиз-

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

(n.f.elansky@mail.ru); Галина Санжиевна Жамсуева (lrf@ipms.bscnet.ru); Александр Савельевич Заяханов (lrf@pres.bscnet.ru, lmza@mail.ru); Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru); Артем Владимирович Козлов (artem@iao.ru);

недеятельность растений и негативно воздействует на организм человека. Как показали биологические и медицинские исследования [1–3], озон в тропосфере является сильнодействующим ядом, обладающим, помимо общетоксических, такими свойствами, как мутагенность, канцерогенность, радиомиметический эффект (действие на кровь подобно ионизирующей радиации). По степени токсичности озон превосходит синильную кислоту. Также озон – мощнейший окислитель, разрушающий резину, каучук, окисляющий многие металлы, даже платиновой группы [4]. Имея продолжительное время жизни в атмосфере (от нескольких дней до нескольких месяцев) и интенсивные линии поглощения излучения, тропосферный озон может играть значительную роль в парниковом эффекте. По оценкам [5], его вклад в общее нагревание воздуха, обусловленное поглощением солнечного излучения парниковыми газами, превышает 8%. Крайне опасное следствие высоких концентраций озона – смоговые ситуации в городах. Первый такой смог был зафиксирован в Лос-Анджелесе [6]. Более детальный анализ, проведенный позже [7], показал, что основным источником озонобразующих веществ были выбросы автотранспорта. С тех пор фотохимический смог стал частым явлением в промышленно развитых городах мира. При попытке избавиться от загрязнения воздуха, вызванного всевозможными выбросами, в мегаполисе Мехико были переведены на использование газового топлива бытовой сектор и транспорт. Эти меры привели к уменьшению концентрации взвешенных частиц (одной из компонент городского загрязнения), однако вызвали формирование опасно высоких концентраций тропосферного озона. [8]. По данным [9], у России есть все основания повторить печальный опыт Мехико.

Мировое сообщество давно оценило масштабы проблемы тропосферного озона и необходимость

исключения его высоких концентраций в воздухе. В США, Мексике, Канаде и в Западной Европе к тропосферному озону относятся как к основному загрязнителю воздуха. Поэтому там организован мониторинг озона как в фоновых, так и в городских условиях. Исследования проводят сотни групп ученых из научно-исследовательских, природоохранных организаций, а также из вузов. Учитывая, что озонное загрязнение имеет трансграничную природу, для его наблюдения, анализа эффектов и информации об источниках эмиссий предшественников тропосферного озона существуют международные договоренности, например в рамках Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния. Российская Федерация (РФ) принимает участие в этой Конвенции, однако до сих пор не ратифицировала протокол о борьбе с подкислением, эвтрофикацией и приземным озоном (Гетеборгский протокол 1999 г.; <https://www.unep.org/fileadmin/AM/env/lrtap/full%20text/1999.Multi.R.Amended.2005.pdf>). Во многих зарубежных странах налажено информирование населения о текущих и ожидаемых в ближайшие дни концентрациях озона в приземном воздухе (например, сайт https://www.academia.edu/7747737/Global_Ozone_Project_Curriculum_for_GO3_Project). Государственные органы по ЧС включили озон в перечень объектов оперативного реагирования. При таких подходах любая новая информация об озоне актуальна.

В России проблема тропосферного озона не нашла должного отклика ни в общественной, ни в научной среде. Регулярный мониторинг приземного озона проводится государственными организациями всего в нескольких крупных городах: Москва, Санкт-Петербург, Казань, Томск, Красноярск, Сочи, Апатиты (Мурманская обл.), Улан-Удэ (табл. 1), а также на инициативно организованных

Таблица 1

Перечень станций, измеряющих приземную концентрацию озона на территории России

| Станция | Регион | Тип станции | Широта | Долгота | Высота над ур. м., м |
|--------------------------|--------------------|--------------|-----------|------------|----------------------|
| ОРТЕС-PR | Ленинградская обл. | фон | 60°42'59" | 30°03'24" | 40 |
| ОРТЕС-Р | Санкт-Петербург | городская | 59°56'27" | 30°15'14" | 8 |
| ОРТЕС-Н | Санкт-Петербург | городская | 59°55'23" | 30°23'17" | 1 |
| СФЭМ «Карадаг» | Республика Крым | фон | 44°55' | 35°14' | 180 |
| Обнинск | Калужская обл. | городская | 55°05'48" | 36°36'36" | 175 |
| РУДН (Москва) | Москва | городская | 55°42'37" | 37°36'78" | 149 |
| АСКЗА «Марьино» | Москва | городская | 55°39'14" | 37°44'58" | 135 |
| АСКЗА «Площадь Гагарина» | Москва | городская | 55°42'31" | 37°34'57" | 120 |
| КВНС ИФА | Северный Кавказ | высокогорная | 44°41'31" | 43°39'40" | 2096 |
| Вятские Поляны | Кировская обл. | фон | 56°13'33" | 51°03'56" | 74 |
| «Фоновая» | Томская обл. | фон | 56°25'07" | 84°04'27" | 80 |
| TOR | Томская обл. | пригородная | 56°28'41" | 85°03'15" | 133 |
| Улан-Удэ | Республика Бурятия | пригородная | 51°86'79" | 107°86'71" | 523 |

Сергей Николаевич Котельников (KotelnikovSN@yandex.ru); Ирина Николаевна Кузнецова (muza@mecom.ru); Владимир Александрович Лапченко (lapchenko@pochta.ru); Елена Александровна Лезина (lezina@mosecom.ru); Олег Владимирович Постыляков (oleg.postylyakov@gmail.com); Денис Евгеньевич Савкин (sde@iao.ru); Ирина Анатольевна Сеник

(sia@ifran.ru); Евгений Валерьевич Степанов (EugeneStepanov@yandex.ru); Геннадий Николаевич Толмачев (tgn@ipc.tsc.ru); Александр Владиславович Фофанов (alenfo@iao.ru); Иван Владимирович Челибанов (ichelibanov@gmail.ru); Владимир Петрович Челибанов (chelibanov@mail.ru); Вадим Викторович Широков (shirokov@rpatyphoon.ru).

станциях (Обнинск, Вятские поляны), в рамках международных проектов [10].

Цель планируемых регулярных публикаций и настоящего обзора – информирование научной общественности о содержании озона в приземном слое воздуха, причинах его изменчивости, а также о соответствии фиксируемых в разных пунктах мониторинга концентраций озона отечественным гигиеническим нормативам.

1. Описание станций и используемых приборов

Поскольку в РФ нет единой системы мониторинга озона на государственном уровне, измерение приземной концентрации почти в половине из приведенных в табл. 1 пунктов производится группами энтузиастов без централизованного финансирования с привлечением средств из разных источников. Естественно, при таком подходе используется достаточно разнородные приборы и подходы. Поэтому в настоящем разделе приводится подробное описание станций на территории России, на которых организован мониторинг концентрации озона в приземном слое воздуха, а также используемого оборудования и способов его калибровки.

Станции измерения по расположению можно разделить на три типа: городские, включая примыкающие (traffic), пригородные и фоновые. Типы и координаты станций по убыванию долготы – с запада на восток – приведены в табл. 1.

Станция ОРТЕС-N расположена в г. Санкт-Петербурге, в районе Александро-Невской лавры. Пробоотборный зонд станции установлен на уровне 2,5 м от поверхности земли. Станция ОРТЕС-P также находится в Санкт-Петербурге, на Васильевском острове. Ее пробоотборный зонд расположен на уровне 16 м от поверхности земли. Станция ОРТЕС-PR базируется в Ленинградской обл., на ст. Громово Приозерского р-на. Отбор проб осуществляется на высоте 2,5 м. На всех станциях для измерения озона используются серийные хемиллюминесцентные анализаторы модели 3.02П-А. На ст. ОРТЕС-PR также в течение нескольких лет ведутся наблюдения за приземной концентрацией метастабильной формы кислорода – $^1\Delta_g(\text{O}_2)$ с помощью анализатора модели 102. На ст. ОРТЕС-N и ОРТЕС-P также ведется мониторинг приземных концентраций NO , NO_2 , SO_2 , CO , аэрозолей PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ и $\text{PM}_{1,0}$. Станции атмосферного мониторинга включают метеокомплексы АИИС-ВП22 (выполненные на базе Vantage Pro-2) для контроля метеорологических параметров. Все средства измерения на станциях аттестованы и ежегодно проходят поверку. Подробное описание типовой станции ОРТЕС приведено в [11].

Государственный природный заповедник «Карадагский» расположен в горном массиве Карадаг на Юго-восточном побережье Крымского полуострова на значительном расстоянии от источников промышленного загрязнения атмосферы. Станция фоновое экологического мониторинга (СФЭМ) Карадаг-

ская научная станция – природный заповедник РАН – филиал ФИЦ ИнБЮМ расположена на территории заповедника, на северо-восточном склоне горы Святая, в дубово-фисташковом редколесье с элементами разнотравно-злаковых сообществ, включающих редкие и эндемичные виды флоры. В непосредственной близости от СФЭМ находятся искусственные посадки сосны крымской и дубово-грабинниковый лес. Расстояние до ближайшего пос. Коктебель – около 1,5 км. От моря станцию отделяет хребет Кок-Кая (320 м над ур. м.).

Для измерений приземной концентрации озона на СФЭМ «Карадаг» используется газоанализатор АРОА-370 (HORIBA, Япония), работающий на оптическом методе (поглощение в УФ-области). Пробы отбираются с использованием тефлоновых трубок на высоте 2 м. Газоанализатор ежемесячно калибруется с помощью генератора АРМС-370 (HORIBA) и ежегодно проходит поверку во Всероссийском научно-исследовательском институте метеорологии (ВНИИМ) им. Д.И. Менделеева (г. Санкт-Петербург). Метеопараметры на СФЭМ «Карадаг» измеряются метеостанциями «ТРОПОСФЕРА-N» (Украина) и WS-600 (Германия) [12].

Станция Обнинск находится в границах первого наукограда РФ – г. Обнинска. Возможно, ее стоит отнести к категории пригородных станций, потому что в Обнинске отсутствуют крупные промышленные предприятия, а региональные центры (Москва и Калуга) находятся на удалении ~ 100 км. Забор проб воздуха организован на высоте 2,5 м, а для анализа приземных концентраций озона используется оптический газоанализатор озона в атмосферном воздухе Ф-105 производства АО «ОПТЭК» (г. Санкт-Петербург) который проходит поверку в соответствии с регламентом. Измерения проводятся в режиме непрерывного (круглосуточного) автоматического долгосрочного мониторинга, исходными данными являются разовые 20-минутные значения. Помимо измерений концентрации приземного озона на станции проводится мониторинг NO , NO_2 , CO , CH_4 , SO_2 , H_2S , NH_3 , суммы углеводородов, массовой концентрации аэрозольных частиц различного размера, а также основных метеорологических параметров.

Станция мониторинга приземного озона, его предикторов и основных метеопараметров была организована в конце 2019 г. в Российском университете дружбы народов (РУДН) в центре Москвы, в пределах Третьего транспортного кольца, по адресу ул. Орджоникидзе, 3 при участии Института общей физики им. А.М. Прохорова (ИОФ) РАН. Станция находится в окружении городской жилой застройки, а также нескольких скверов и бульваров, на удалении ~ 1 км от близлежащих транспортных автомагистралей, являющихся основными источниками предшественников озона (Садовое кольцо, Ленинский пр-т, Варшавское шоссе и Третье транспортное кольцо). Промышленные объекты на указанном удалении от основных транспортных развязок отсутствуют. Станция представляет собой автоматический пост. Помимо приземного озона на ней

проводится мониторинг NO , NO_2 , CO , CH_4 , суммы углеводородов, массовой концентрации аэрозольных частиц различного размера, а также основных метеорологических параметров. Для измерений озона используется хемилюминесцентный газоанализатор типа 3-02П, разработанный и изготовленный предприятием АО «ОПТЭК». Забор воздуха осуществляется во внутреннем дворе комплекса зданий РУДН с высоты ~ 5 м через стандартные тefлоновые пробоотборники, которыми комплектуется аналитическое оборудование. Измерения проводятся в режиме непрерывного долговременного мониторинга. Текущие значения измеряемых параметров регистрируются раз в минуту и сохраняются в базе данных.

В Москве функционирует региональная сеть экологического мониторинга Государственного природоохранного бюджетного учреждения (ГПБУ «Мосэкомониторинг»), специально уполномоченной организации г. Москвы по осуществлению государственного экологического мониторинга (<https://mosecom.mos.ru/>). Регулярные измерения приземной концентрации озона (ПКО) проводятся на 17 станциях автоматического контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) ежечасно и круглосуточно; в базу данных записываются средние значения за 20-минутный интервал, что позволяет соотносить измерения с максимальными разовыми предельно допустимыми концентрациями. Все станции ГПБУ «Мосэкомониторинг» оборудованы высокоточными современными приборами, внесенными в Государственный реестр средств измерений и поверенными в Государственной метрологической службе (<https://mosecom.mos.ru/novosti-i-publikacii/2020/06/mosekomonitoring-provodit-masshtabnyyu-zamenu-13-stancij-kontrolya-atmosfernogo-vozduxa/>). В ежегодном докладе публикуются аналитические материалы о состоянии окружающей среды в г. Москве (<https://www.mos.ru/eco/documents/doklady/view/>). В настоящем обзоре представлены данные наблюдений на двух станциях, расположенных на расстоянии ~ 11 км друг от друга: АСКЗА городского типа (Марьино) и примагистрального типа (Площадь Гагарина).

Кисловодская высокогорная научная станция (КВНС) была создана в конце 1970-х гг. Институтом физики атмосферы им. А.М. Обухова (ИФА) РАН (Москва) на высокогорном плато для изучения атмосферы и отработки методов исследований. Ближайший населенный район — не промышленный, ближайший город — курортный Кисловодск в 20 км. Обширное плато Шаджатмаз, расположенное к северу от Главного Кавказского хребта, покрыто альпийскими и субальпийскими лугами. К югу от плато находится ущелье, и до самых гор бокового хребта Северного Кавказа тянется природный заказник, эти места безлюдны. А в 46 км по прямой от КВНС — гора Эльбрус (5642 м над ур. м.). В 1,5 км к востоку от КВНС недавно построена автотрасса. Благодаря удачной топографии КВНС большую часть времени находится в свободной тропосфере. Главный Кавказский хребет расположен почти вдоль направления переноса воздушных масс,

преимущественно зонального на этой высоте, поэтому эффект подъема существенно ослаблен по сравнению с наблюдающимся на европейских высокогорных станциях.

Непрерывные измерения приземного озона начаты в 1989 г. сетевым газоанализатором озона Dasibi 1008-АН (Environmental corp., США). Круглосуточно автоматически регистрируются минутные значения. Воздухозабор осуществляется на высоте 4 м с использованием стандартных тefлоновых трубок, которые регулярно подвергаются очистке. Газоанализатор калибруется во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева. Долгое время измерения озона сопровождались регистрацией приземных концентраций NO_x (TE — Model 42C Trace Level), CO (Horiba-APMA-360, Ambient CO Monitor), а также ряда аэрозольных характеристик. В настоящее время работают две метеостанции (DAVIS), требующие профилактики и калибровки, ИК-спектрометр ИФА РАН (ОС CO и H_2O), комплекс ORIEL (ОС NO_2). С 1989 г. проводятся измерения ОСО сетевым спектрофотометром Brewer N 43. КВНС входит в Мировую озонометрическую сеть (№ 282).

Станция мониторинга атмосферного воздуха Вятские Поляны установлена в городе Вятские Поляны, на юге Кировской обл. Она находится на значительном удалении от ближайших промышленных центров: Набережные Челны — 97 км, Казань — 131 км, Ижевск — 148 км, Вятка — 277 км. В городе и районе отсутствуют промышленные предприятия с газовыми выбросами, а воздушный фон формируется за счет местного автотранспорта и регионального переноса. Для измерения приземных концентраций озона используется хемилюминесцентный газоанализатор 3.02 П-А. Производитель ежегодно калибрует прибор с использованием рабочего эталона 1-го разряда и ежемесячно — с помощью генератора ГС-024-2. Измерительный комплекс расположен в помещении на пятом этаже жилого дома в парковой зоне, забор анализируемого воздуха производится через тefлоновую трубку на высоте 10 м.

TOR-станция представляет собой автоматический пост, расположенный на северо-восточной окраине томского Академгородка. Вблизи станции отсутствуют промышленные объекты и автомагистрали, вокруг имеются небольшие массивы лиственных и хвойных пород. При направлении переноса воздушных масс с западной составляющей пост оказывается под влиянием воздуха, прошедшего г. Томск и обогащенного выбросами промышленности и автотранспорта. В остальных случаях воздух поступает из фоновых районов. Для измерений озона используется хемилюминесцентный газоанализатор 3-02П. Забор воздуха на TOR-станции осуществляется через тefлоновые трубки на высоте 5 м. Измерения на посту проводятся ежечасно и круглосуточно. Отсчеты производятся с частотой 1 Гц, определяется среднее значение за 10-минутный промежуток времени.

Станция мониторинга обсерватории «Фоновая» расположена на правом (восточном) берегу р. Оби, в 60 км к западу от Томска. Территорию между станцией и Томском покрывают в основном хвойные

деревья, в непосредственной близости от станции — смешанный лес (березы, осины и сосны). На станции установлена мачта высотой 44 м. Забор воздуха осуществляется через тефлоновые трубки на высоте 10 и 30 м. Для измерений используется УФ-озонметр фирмы ТЕI (США), модель 49С. Измерения на посту проводятся ежечасно и круглосуточно. Отсчеты производятся с частотой 4 Гц и определяется среднее значение за 10-минутный промежуток времени. Озонметры на ТОR-станции и в обсерватории «Фоновая» еженедельно калибруются с помощью генератора ГС-024-2.

В пригороде Улан-Удэ, в 30 км к востоку от центра города, во втором квартале 2020 г. был организован мониторинг приземного озона. Пункт наблюдения расположен в Удинской межгорной впадине на надпойменной террасе р. Уда. К северу располагаются заболоченные территории. Пробы воздуха для определения концентрации приземного озона отбираются на высоте 2 м с использованием теф-

лоновых трубок, измерения проводятся хемилуминесцентным газоанализатором 3.02 П-А. Калибровка и установка нуля осуществляются автоматически при помощи встроенных источников микропотоков по командам процессора газоанализаторов. Дополнительно для контроля погрешности измерений газоанализатор периодически калибруется с помощью калибратора «Mod. 8500 Monitor Labs».

2. Результаты измерений

2.1. Приземный слой

Начнем анализ с городских станций, которые расположены на территориях с большей плотностью населения, так как повышенная концентрация озона отрицательно влияет на здоровье людей. Таких станций в нашем обзоре шесть: две в Санкт-Петербурге, три в Москве и одна в Обнинске (рис. 1).

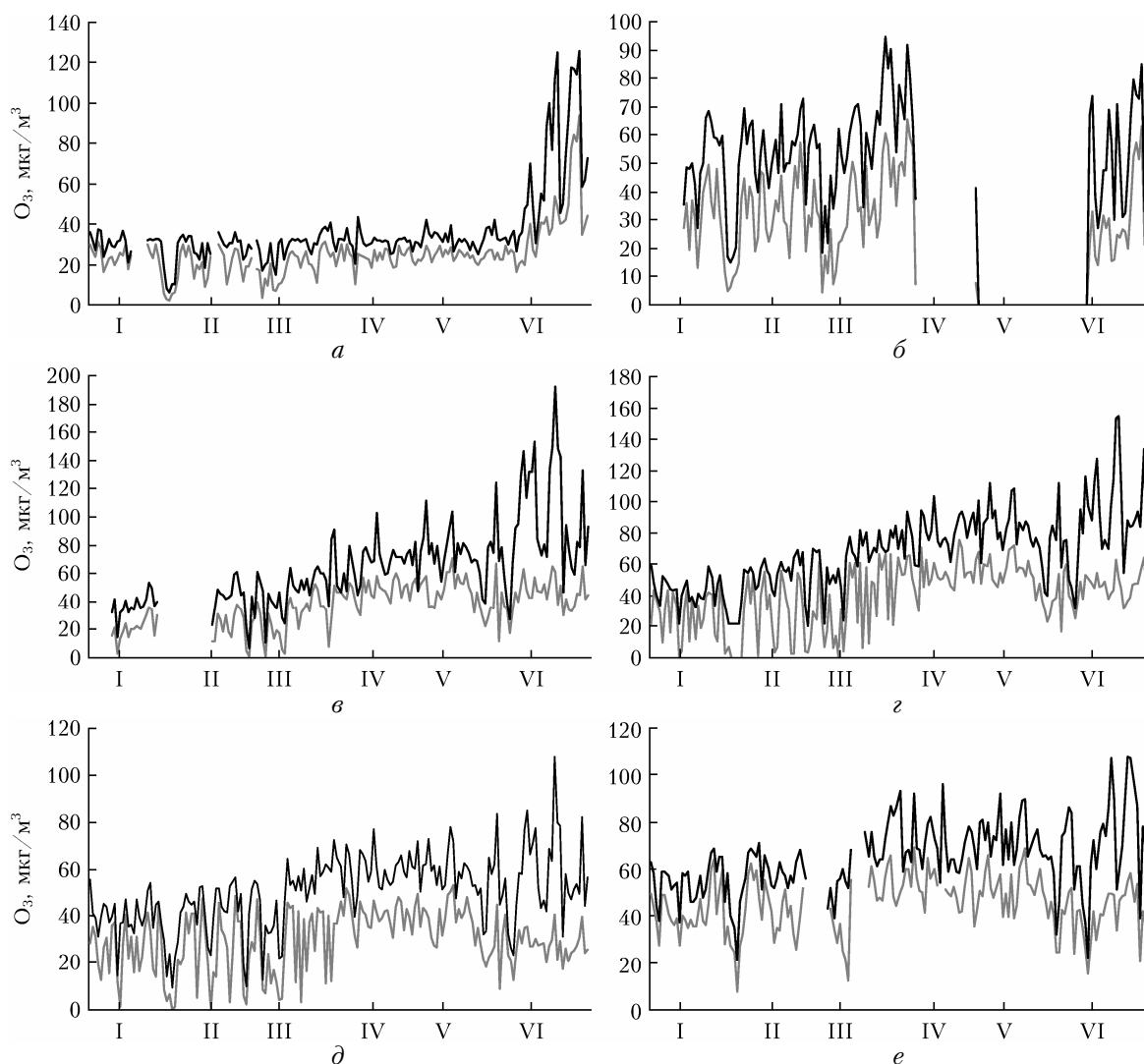


Рис. 1. Среднесуточные (серая кривая) и максимальные за день (черная кривая) концентрации озона в приземном слое воздуха на станциях: а — ОРТЕС-Р; б — ОРТЕС-Н; в — РУДН; з — АСКЗА «Марьино»; д — АСКЗА «Площадь Гагарина»; е — Обнинск

На всех городских станциях виден рост концентрации озона от холодного периода к теплому, как среднесуточных значений, так и максимальных за сутки. На рис. 1 также прослеживаются периодические колебания обеих характеристик, обусловленные ходом синоптических процессов и колебаниями уровня загрязнения приземного воздуха [13–16].

Зимой в Москве содержание приземного озона в целом низкое, с незначительными межсуточными колебаниями. Начиная с марта благодаря усилению тропосферно-стратосферного обмена приземный слой атмосферы интенсивно пополняется тропосферным озоном, при этом в приземном воздухе увеличиваются концентрация озона и ее внутрисуточная амплитуда [16]. Эти характерные сезонные отличия ПКО достаточно четко проявились и в первой половине 2020 г. (рис. 1, в–д).

За первое полугодие 2020 г. средняя ПКО на АСКЗА «Марьино» (станция городского типа) составила 40 мкг/м^3 , на АСКЗА «Площадь Гагарина» (городская, примагистральная) – 30 мкг/м^3 , в период январь – март – 29 и 25 мкг/м^3 соответственно. Значительно большие отличия ПКО на станциях различной типовой принадлежности отмечались в апреле – июне: усредненная за эти месяцы средняя суточная ПКО на АСКЗА городского типа составила 50 мкг/м^3 , на АСКЗА примагистрального типа – 34 мкг/м^3 . Приведенные данные подтверждают характерную для мегаполиса высокую пространственную неоднородность поля приземного озона. Существенно большей пространственной изменчивостью отличается максимальная за сутки приземная концентрация озона (ПКО_{max}): в первом квар-

тале на станции придорожного типа усредненная ПКО_{max} была меньше, чем на станции городского типа, почти на 10 мкг/м^3 , во втором квартале – на $\sim 25 \text{ мкг/м}^3$. В отдельные дни (во второй декаде июня) различия между суточными максимумами на рассматриваемых АСКЗА превышали 50 мкг/м^3 , что наблюдалось в периоды волн жары при повышении дневной температуры до $+28\text{--}31 \text{ }^\circ\text{C}$.

Подобная динамика концентрации озона зафиксирована и в Обнинске (рис. 1, з). Хотя можно отметить и различия. В конце мая – июне при росте максимальных значений начали уменьшаться среднесуточные концентрации озона. Относительная близость к Москве отражается также и во временных вариациях.

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

Из рис. 2, б видно, что ПКО_{max} на СФЭМ «Карадаг» за первое полугодие была зафиксирована 16 мая в 01:00 и составила 142 мкг/м^3 . Этот ночной максимум ПКО можно объяснить только стоком озона из верхних слоев атмосферы в нижние. При прохождении фронта 21 июня произошло резкое изменение концентрации озона. До выпадения осадков приземная концентрация составляла 96 мкг/м^3 при температуре воздуха $28 \text{ }^\circ\text{C}$. В течение часа после дождя температура упала на $10 \text{ }^\circ\text{C}$, и ПКО понизилась до 48 мкг/м^3 . Наибольшие изменения ПКО связаны с фронтальными осадками и отражают «скачок» концентраций при смене воздушных масс, но при выпадении атмосферных осадков,

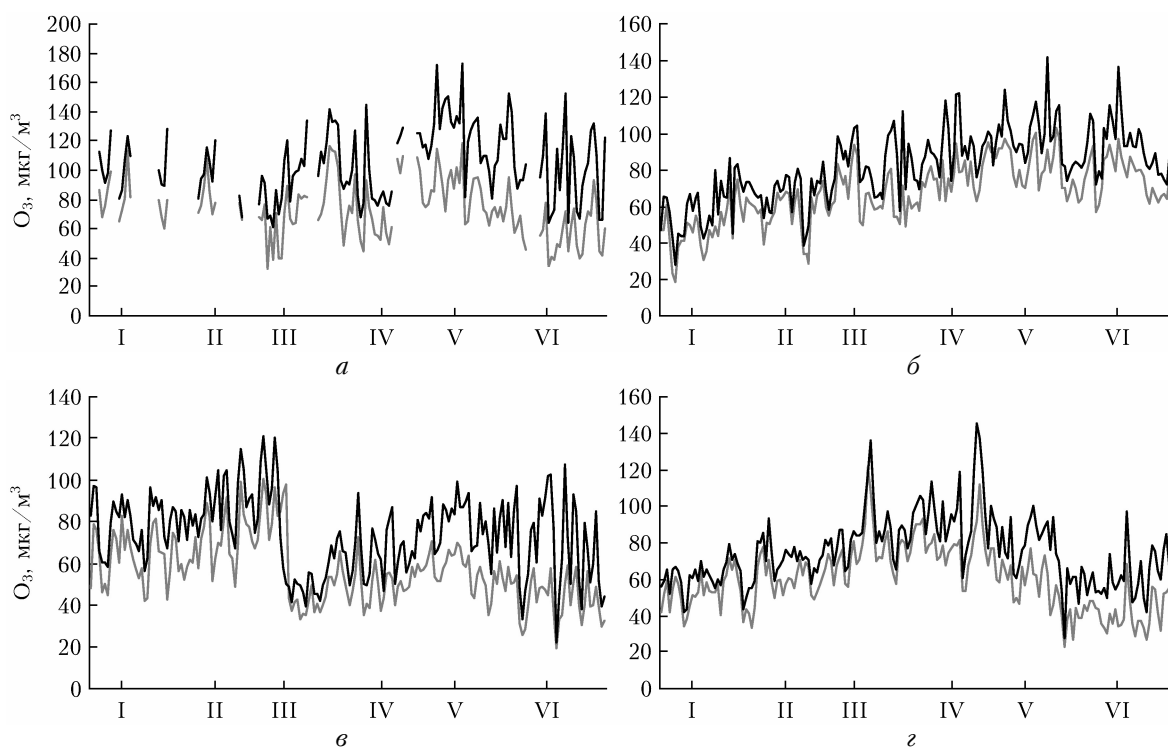


Рис. 2. Среднесуточные (серая кривая) и максимальные за день (черная кривая) концентрации озона в приземном слое воздуха на станциях: а – ОРТЕС-PR, б – СФЭМ «Карадаг», в – Вятские Поляны, г – «Фоновая»

независимо от их вида, интенсивности и района измерений, может отмечаться как рост, так и падение ПКО [17].

Отметим, что для режима ПКО на СФЭМ «Карадаг», в отличие от равнинных станций, характерна меньшая амплитуда суточного хода вследствие больших ночных концентраций озона. Повышенный уровень ночных концентраций приземного озона обусловлен особенностями окружающего ландшафта: станция расположена на открытом склоне, на высоте 180 м над ур. м. Именно поэтому вертикальный обмен с вышележащими слоями пограничного атмосферного слоя в темное время суток не прекращается и, по-видимому, препятствует образованию термической устойчивой стратификации воздуха [18]. Анализ синоптической ситуации в первом и втором квартале 2020 г. свидетельствует о том, что наиболее высокие концентрации озона регистрировались при южном и юго-восточном направлениях движения воздушных масс, что относительно расположения СФЭМ соответствует направлению со стороны моря.

Вятские Поляны — единственная на территории России станция, на которой четко обозначился весенний максимум концентрации озона (рис. 2, в), после которого среднесуточная концентрация резко упала с 90 до 45 мкг/м³, а максимальная — со 115 до 50 мкг/м³. Затем среднесуточная концентрация незначительно возросла с колебаниями, обусловленными синоптическими процессами. Максимальные значения, как это видно из рис. 2, в, были несколько выше. Подобный ход концентрации озона авторы [19] объясняют тем, что после схода снежного покрова резко повышается сток озона на подстилающую поверхность. Следовательно, если фотохимическая генерация или осаждение озона из вышележащих слоев остаются прежними, то его сток резко возрастает. В пользу этого говорят данные [20], где показано, что скорости осаждения озона на снег и открытую поверхность могут отличаться на три порядка.

В обсерватории «Фоновая» также можно выделить два весенних пика концентрации озона, в марте и апреле (рис. 2, г). Однако синоптический анализ показал, что они связаны с нарушением естественного сезонного хода процессов, а именно с приходом на территорию региона субтропического воздуха, который, согласно [21], значительно более обогащен озоном по сравнению с обычно наблюдаемыми умеренными или арктическими воздушными массами.

В отличие от городских станций (см. рис. 1) фоновые станции (см. рис. 2) показывают большую и более разнообразную временную динамику изменения концентрации озона в первом полугодии 2020 г. Вместе с тем на обоих рисунках прослеживается рост значений ПКО в связи с сезонным увеличением температуры воздуха. В ряде работ установлена зависимость генерации озона от температуры воздуха [22–24]. Особенно это стало актуально в связи с выявленной синхронностью максимумов концентрации озона с появлением тепловых волн в жаркую погоду [25, 26]. Таким образом, отмечен-

ная тенденция роста значений ПКО в связи с сезонным увеличением температуры проявляется и в других регионах нашей планеты.

Две станции, осуществляющие мониторинг озона в приземном слое воздуха, расположены в пригородной зоне. Это TOR-станция в Томске и станция в Улан-Удэ. Теоретически по своему местоположению они должны отражать промежуточную картину между городскими и фоновыми условиями. Данные измерений на них представлены на рис. 3.

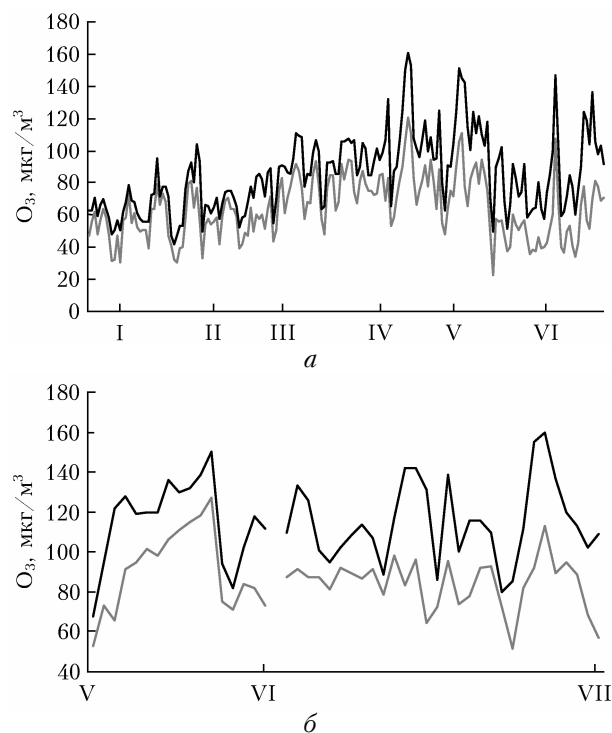


Рис. 3. Среднесуточные (серая кривая) и максимальные за день (черная кривая) концентрации озона в приземном слое воздуха: *a* — на TOR-станции; *б* — ст. Улан-Удэ

Поскольку между TOR-станцией и обсерваторией «Фоновая» расстояние небольшое (60 км), то характер временной динамики концентрации озона на обеих станциях подобен (рис. 2, в и рис. 3, а). Разница в более высоких концентрациях, как среднесуточных, так и максимальных, на пригородной станции. Очевидно, что, периодически находясь в шлейфе выбросов г. Томска, где имеется дополнительное количество газов-предшественников озона, TOR-станция фиксирует более высокие концентрации.

Для ст. Улан-Удэ в рассматриваемый период характерны высокие концентрации озона, и среднесуточные, и максимальные (рис. 3, б). Можно также отметить более длительные циклы однонаправленного изменения концентрации по сравнению с рассмотренными выше станциями. К сожалению, станция работала не весь анализируемый период, поэтому оценить сезонную тенденцию изменения озона по рис. 3, б трудно.

Особое место в обзоре занимает высокогорная КВНС (рис. 4). Из всех высокогорных станций ее выделяют удачная топография и умеренный климат,

обеспечивающие ее нахождение большую часть времени в воздухе, который относится к свободной атмосфере. Горный рельеф способствует переносу чистого и обогащенного озоном воздуха из стратосферы в свободную тропосферу. В то же время в соответствии с действием горно-долинной циркуляции вдоль прогреваемых днем склонов из долины может подниматься загрязненный воздух. Интенсивность горно-долинной циркуляции и заносов загрязнений зависит от топографии. Большинство известных высокогорных станций неудачно расположены: на крутых склонах гор или на их вершинах и вблизи населенных долин, что приводит к застою вдоль склона (или забросу) загрязнений планетарно-пограничного слоя к месту наблюдений.

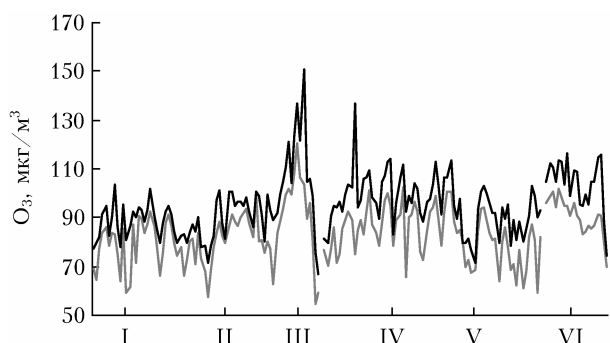


Рис. 4. Среднесуточные (серая кривая) и максимальные за день (черная кривая) концентрации озона в приземном слое воздуха на КВНС

На плато Шаджатмаз невелика вероятность поступления загрязнений из ШПС на КВНС. Для ее определения в ближайшем городе Кисловодске был установлен дублирующий измерительный комплекс, регистрирующий озон, аэрозоли, NO_x , CO . В течение двух лет сопоставлялись уровни и закономерности поведения примесей на двух уровнях тропосферы для понимания, влияет ли пограничный слой воздуха долины на свободную тропосферу высокогорного плато [27]. Таким образом, можно утверждать, что многолетний ряд наблюдений озона на КВНС содержит характеристики регионального или глобального поля тропосферного озона [28].

Важные функции высокогорных станций — регистрация регионального фона и изучение дальнего трансграничного переноса антропогенных и природных загрязнений из районов-источников, а также определение источников. Такие исследования успешно предпринимались для разных целей: выявление условий, когда на курортный регион Кисловодских минеральных вод воздействуют местные пожары, загрязнения от промышленных предприятий Украины или от Каспийских нефтеразработок, оценка влияния пустынь (Калмыкия, Кызыл-Кум) и Иранского нагорья в условиях меняющегося климата и пр. [29, 30].

По наблюдениям в первом квартале 2020 г. можно отметить отдельные эпизоды существенного увеличения концентрации приземного озона в марте — апреле с признаками поступления озона из вы-

шележащих слоев атмосферы: повышение концентрации приземного озона сопровождалось понижением влажности до 17% и усилением ветра южного — восток-юго-восточного направлений (со стороны гор) (рис. 4). Подобные затоки/вторжения озона возможны в разрыве тропопаузы мигрирующего весной над КВНС субтропического струйного течения. Возможны другие орографические эффекты, сопровождающиеся стоками озона, происходящие ежегодно и формирующие, наряду с летним, первый локальный максимум в сезонной изменчивости. Эта бимодальность отражает участие в формировании поля озона двух механизмов его образования: вертикального переноса из стратосферы и фотохимического образования в тропосфере.

Низкие концентрации озона (от 20–30 мкг/м³) в горах, в том числе на высоте КВНС (2096 м), регистрируются в условиях высокой относительной влажности (более 75%). Высокая влажность связана с локальной причиной — «низкой», «наземной» облачностью. Радиационные туманы на КВНС встречаются очень редко и могут продолжаться много дней. Гетерогенное осаждение озона очень эффективно, однако значений озона, близких к нулю, не встречается. Даже очень высокая влажность не является гарантией низкой концентрации приземного озона в случае интенсивной конвекции в облаке. Надо понимать, что низкие значения концентрации приземного озона такого происхождения не являются характеристикой регионального поля (облако — очень локальный регулятор озона).

2.2. Пограничный слой и свободная тропосфера

ИОА СО РАН с июля 1997 г. по настоящее время выполняет ежемесячные полеты на самолете-лаборатории «Оптик» для определения вертикального распределения газового и аэрозольного составов. Вначале полеты выполнялись на самолете Ан-30 [31], затем на Ту-134 [32] над районом Караканского бора, на расстоянии 100 км к юго-западу от г. Новосибирска, для исключения влияния города. Взлет производится в полдень, когда происходит максимальная фотохимическая генерация озона, полет длится 2 ч. Высотный диапазон составляет от 0 до 7 км. В 2020 г. из-за коронавируса состоялись не все запланированные полеты. Поскольку имеется проблема измерения концентрации озона в условиях, отклоняющихся от фоновых, которая ранее обсуждалась в [33, 34], то на борту одновременно работают три озонметра: хемилюминесцентный 3-02П и два ультрафиолетовых (модель 49С Thermo Environment Inc., США). Озонметры калибруются перед вылетом с помощью генератора озона ГС-2.

Данные измерений вертикального распределения озона, приведенные на рис. 5, показывают, что в холодный период (январь — март), когда поверхность земли покрыта снегом, генерации озона в пограничном слое атмосферы не было. Она наблюдалась лишь в июне. Таким образом, основное поступление O_3 в холодный период происходило

из стратосферы. Причем поток был не очень интенсивный, так как вертикальное распределение в средней тропосфере близко к нейтральному.

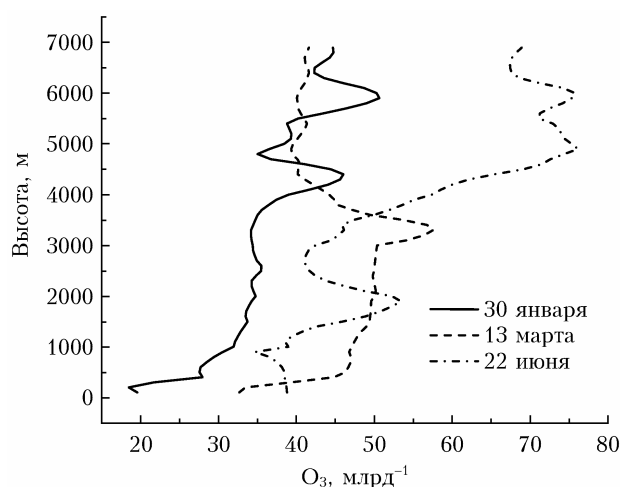


Рис. 5. Вертикальное распределение озона над югом Западной Сибири в 2020 г.

Приведенные на рис. 5 данные существенно отличаются от результатов многолетнего зондирования, которые были ранее обобщены в [35] для этого же района. Они показывали почти постоянное фотохимическое образования озона в приземном или пограничном слоях атмосферы. Эти данные также противоречат выводам [36] о вкладе источников на европейской территории России и Западной Сибири в фотохимическое образование озона в размере 20–30%. Пока трудно объяснить этот факт. Возможно, это особенности естественной многолетней динамики вертикального распределения озона в тропосфере [35] или отражение наблюдающегося потепления климата, как это показано в [37, 38]. Тем не менее такое вертикальное распределение озона в тропосфере позволяет объяснить ночные максимумы в приземном слое воздуха и дневное увеличение за счет развития турбулентности [39, 40].

3. Соответствие гигиеническим нормативам

Нужно отметить, что в России самые жесткие в мире ПДК для озона. Так, в ЕС информационный порог для населения установлен на уровне 180 мкг/м^3 . Всемирная организация здравоохранения определила скользящий 8-часовой максимум 120 мкг/м^3 . Национальный стандарт по качеству NAASQS (США) выглядит так: максимальная средняя концентрация за 1 ч не должна превышать 120 млрд^{-1} ; а средняя за 8-часовой период — 85 млрд^{-1} , что соответствует 240 и 170 мкг/м^3 . В РФ установлены следующие нормативы по концентрации озона в приземном слое воздуха [41, 42].

Среднесуточная предельно допустимая концентрация (ПДК_{с.с.}) — это максимальная концентрация вредного вещества в воздухе населенных мест, которая не должна оказывать на человека прямого или косвенного воздействия при неограниченно долгом вдыхании (круглые сутки в течение всей жизни). Для озона она равна $0,03 \text{ мг/м}^3$ или 30 мкг/м^3 .

Максимальная разовая допустимая концентрация (ПДК_{м.р.}) — это максимальная концентрация вредного вещества в воздухе населенных мест, не вызывающая при вдыхании в течение 20 мин рефлекторных (в том числе субсенсорных) реакций в организме человека (ощущение запаха, изменение световой чувствительности глаз и др.). Она равна $0,16 \text{ мг/м}^3$, или 160 мкг/м^3 .

Предельно допустимая концентрация вредного вещества в воздухе рабочей зоны (ПДК_{р.з.}) — это максимальная концентрация, которая при продолжительности работы не более 41 ч в неделю на протяжении всего рабочего стажа не вызывает заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследования в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующего поколений. Она составляет $0,1 \text{ мг/м}^3$, или 100 мкг/м^3 .

С опорой на указанные стандарты составлена табл. 2, в которой собраны случаи превышения

Таблица 2

Превышение предельно допустимых концентраций озона в приземном слое воздуха на территории России

| Станция | ПДК _{с.с.} (30 мкг/м^3) | | | ПДК _{р.з.} (100 мкг/м^3) | ПДК _{м.р.} (160 мкг/м^3) |
|--------------------------|--|--------------|--------------|---|---|
| | 1ПДК (дни/%) | 2ПДК (дни/%) | 3ПДК (дни/%) | | |
| ОРТЕС-PR | 134/100 | 106/79 | 25/19 | 13 | 2 |
| ОРТЕС-Р | 23/13 | 2/1 | 0/0 | 0 | 0 |
| ОРТЕС-Н | 50/45 | 2/2 | 0/0 | 0 | 0 |
| СФЭМ «Карадаг» | 179/98 | 120/66 | 17/10 | 29 | 0 |
| Обнинск | 138/86 | 15/9 | 0/0 | 0 | 0 |
| РУДН (Москва) | 110/72 | 9/6 | 0/0 | 16 | 1 |
| АСКЗА «Марьино» | 132/73 | 26/14 | 0/0 | 12 | 0 |
| АСКЗА «Площадь Гагарина» | 97/54 | 0/0 | 0/0 | 1 | 0 |
| КВНС ИФА | 169/100 | 164/97 | 35/21 | 10 | 0 |
| Вятские Поляны | 182/100 | 67/37 | 7/4 | 14 | 0 |
| ТОР | 181/99 | 41/54 | 16/8 | 45 | 1 |
| «Фоновая» | 178/97 | 48/47 | 8/4 | 13 | 0 |
| Улан-Удэ | 48/100 | 45/94 | 20/42 | 33 | 1 |

перечисленных выше ПДК. Поскольку озон не выбрасывается ни одним производством, а образуется в самой атмосфере в ходе фотохимических процессов, понятие рабочей зоны для этого компонента воздуха получается весьма условным. Для озона в подобном случае нет границы производственной площадки или санитарной зоны, так как он находится везде. Сельскохозяйственный рабочий на поле или сотрудник ГАИ, дежурящий на автотрассе, будут подвергаться его воздействию на рабочем месте. Это в значительной степени относится к многочисленным дачникам, которые обрабатывают свои участки. Хотя в некоторых случаях рабочую зону для озона можно определить. Например, офис, в котором работает копировальная техника [43]. Поэтому в табл. 2 выделены случаи с превышением значения 100 мкг/м³.

Из данных табл. 2 следует, что в соответствии с отечественным нормативом (ПДК_{с.с.}) во всех рассматриваемых пунктах в первом полугодии 2020 г. наблюдалась повышенная концентрация озона в приземном слое воздуха. Почти повсеместно наблюдается 100%-е превышение ПДК. Исключение составляют лишь городские станции, где озон уничтожается выбросами транспорта. Достаточно часто в фоновых и пригородных районах концентрация озона превышает 2ПДК_{с.с.}. Не считая высокогорную КВНС ИФА, где влияние на концентрацию озона оказывает свободная тропосфера, более 50% дней с концентрацией больше 2ПДК_{с.с.} отмечается на Карадаге, в Томской обл. и Бурятии. В этих же районах регулярно превышает величина 3ПДК и наиболее часто фиксируется превышение 100 мкг/м³. Зафиксированы единичные случаи превышения ПДК_{м.р.} на ст. РУДН в Москве (июнь), в Томской обл. (апрель), в Улан-Уде (июнь) и в Ленинградской обл. (май).

Заключение

Таким образом, проведенный обзор показывает, что на территории России концентрация озона в приземном слое воздуха в большинстве пунктов 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. Не представлены данные по многим крупным регионам страны. Это указывает на необходимость расширения числа пунктов мониторинга озона.

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

Для подготовки обзора использовались данные, полученные с помощью инфраструктуры ИОА СО РАН, созданной и эксплуатируемой по госзаданию

№ АААА-А17-117021310142-5, включая ЦКП «Атмосфера», инфраструктуры ИФМ СО РАН, созданной и эксплуатируемой по Госзаданию № АААА-А17-117121140006-0, инфраструктуры КНС – ПЗ РАН филиала ФИЦ ИнБЮМ по Госзаданию № АААА-А19-119012490044-3, инфраструктуры ИФА РАН по Госзаданию № 0129-2019-0002, инфраструктуры ИОФ РАН по Госзаданию АААА-А18-118030690095-8

1. *Перов С.П., Хргиан А.Х.* Современные проблемы атмосферного озона. Л.: Гидрометеониздат, 1980. 288 с.
2. *Лукин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н.* Физическая химия озона. М.: МГУ, 1998. 480 с.
3. *Белан Б.Д.* Озон в тропосфере. Томск: ИОА СО РАН, 2010. 488 с.
4. *Разумовский С.В., Зайков Г.Е.* Озон и его реакции с органическими соединениями (кинетика и механика). М.: Наука, 1974. 322 с.
5. *WMO Reactive Gases.* WMO. 2018, N 2. 8 p.
6. *Naagen-Smit A.J.* Chemistry and physiology of Los Angeles smog // *Ind. End. Chem.* 1952. V. 44. P. 1342–1346.
7. *Naagen-Smit A.J., Fox M.M.* Ozone formation in photochemical oxidation of organic substances // *Ind. Eng. Chem.* 1956. V. 48. P. 1484–1487.
8. *Blake D.R., Rowland F.S.* Urban leakage of liquefied petroleum gas and its impact on Mexico City air quality // *Science.* 1995. V. 269, N 5226. P. 953–956.
9. *Белан Б.Д.* Перевод автотранспорта на газ – возможные проблемы // *Вестн. РАН.* 2015. Т. 85, № 3. С. 233–239.
10. *Еланский Н.Ф.* Российские исследования атмосферного озона и его предшественников в 2015–2018 гг. // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2020. Т. 56, № 2. С. 170–185.
11. *Челибанов В.П., Котельников С.Н., Смирнов Н.В., Ясенко Е.А.* Перспектива применения программно-аппаратного комплекса ПАК-8816 при построении глобальной системы мониторинга загрязнения атмосферного воздуха // *Биосфера.* 2015. Т. 7, № 1. С. 119–123.
12. *Лапченко В.А., Звягинцев А.М.* Малые газовые составляющие атмосферы в Карадагском природном заповеднике в Крыму // *Оптика атмосфер. и океана.* 2015. Т. 28, № 2. С. 178–181; *Lapchenko V.A., Zvyagintsev A.M.* Trace atmospheric gases in the Karadag Nature Reserve in Crimea // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 4. P. 308–311.
13. *Zhang Y., Mao H., Ding A., Zhou D., Fu C.* Impact of synoptic weather patterns on spatio-temporal variation in surface O₃ levels in Hong Kong during 1999–2011 // *Atmos. Environ.* 2013. V. 73. P. 41–50.
14. *Shen L., Mickley L.J., Tai A.P.K.* Influence of synoptic patterns on surface ozone variability over the eastern United States from 1980 to 2012 // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15, N 19. P. 10925–10938.
15. *Plocostea T., Calif R., Jacoby-Koalyb S.* Multi-scale time dependent correlation between synchronous measurements of ground-level ozone and meteorological parameters in the Caribbean Basin // *Atmos. Environ.* 2019. V. 211. P. 234–246.
16. *Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А., Лапченко В.А., Никифорова М.П., Демин В.И.* Исследования и мониторинг приземного озона в России // *Тр. Гидрометцентра Российской Федерации.* 2017. № 365. С. 56–70.
17. *Аршинова В.Г., Белан Б.Д., Лапченко В.А., Лапченко Е.В., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Склад-*

- нева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофронов А.Ф. Изменение приземной концентрации озона при выпадении осадков // Оптика атмосфер. и океана. 2019. Т. 32, № 8. С. 657–664; Arshinova V.G., Belan B.D., Lapchenko V.A., Lapchenko E.V., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fofonov A.V. Changes in surface ozone concentration during precipitation // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 6. P. 671–679.
18. Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А. Режим приземного озона на станции Карадаг в Крыму по наблюдениям 2009–2018 гг. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 2(372). С. 102–113.
 19. Людчик А.М., Покаташкин В.И., Гиржедене Р. О связи времени таяния снежного покрова с появлением весеннего максимума озона // Тр. совещания-семинара «Проблема мониторинга приземного (тропосферного) озона и нейтрализация его влияния». М.: ИОФ РАН, 2013. С. 87–91.
 20. Clifton O.E., Fiore A.M., William J., Massman W.J., Baublitz C.B., Coyle M., Emberson L., Fares S., Farmer D.K., Gentile P., Gerosa G., Guenther A.B., Helmig D., Lombardozzi D.L., Munger J.W., Patton E.G., Pusede S.E., Schwede D.B., Silva S.J., Sörgel M., Steiner A.L., Tai A.P.K. Dry deposition of ozone over land: Processes, measurement, and modeling // Rev. Geophys. 2020. V. 58, N 1. P. 1–62.
 21. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Исследование состава воздуха в различных воздушных массах // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 9. С. 752–759; Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., Dudorova N.V., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fofonov A.V. Study of air composition in different air masses // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 1. P. 72–79.
 22. Ueno H., Tsunematsu N. Sensitivity of ozone production to increasing temperature and reduction of precursors estimated from observation data // Atmos. Environ. 2019. V. 211. P. 234–246.
 23. 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.
 24. 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. Air-temperature dependence of the ozone generation rate in the surface air layer // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 2. P. 187–196.
 25. Ma M., Gao Y., Wang Y., Zhang S., Leung L.R., Liu C., Wang S., Zhao B., Chang X., Su H., Zhang T., Sheng L., Yao X., Gao H. Substantial ozone enhancement over the North China Plain from increased biogenic emissions due to heat waves and land cover in summer 2017 // Atmos. Chem. Phys. 2019. V. 19, N 19. P. 12195–12207.
 26. Yang L., Luo H., Yuan Z., Zheng J., Huang Z., Li C., Lin X., Louie P.K.K., Chen D., Bian Y. Quantitative impacts of meteorology and precursor emission changes on the long-term trend of ambient ozone over the Pearl River delta, China, and implications for ozone control strategy // Atmos. Chem. Phys. 2019. V. 19, N 20. P. 12901–12916.
 27. Еланский Н.Ф., Сеник И.А. Измерения приземной концентрации озона на высокогорной научной станции Кисловодск: сезонные и суточные вариации // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1995. Т. 31, № 2. С. 251–259.
 28. 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.
 29. Шукуров К.А., Сеник И.А., Постыляков О.В. Влияние дальнего переноса на приземный озон на высокогорной научной станции ИФА РАН (Северный Кавказ, Кисловодск) // Оптика атмосфер. и океана. Физ. атмосфер. Материалы XXVI Междунар. симп. (6–10 июля 2020 года, Москва). С. D-211.
 30. Shukurov K.A., Postilyakov O.V., Borovski A.N., Shukurova L.M., Gruzdev A.N., Elovkhov A.S., Savinykh V.V., Senik I.A., Mokhov I.I., Semenov V.A., Chkhetiani O.G. Trajectory analysis of long range transport of atmospheric admixtures and temperature anomalies by trajectory anomalies in A.M. Obukhov IAP RAS // IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci. 2019. С. 012048.
 31. 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.
 32. 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. 805–816.
 33. 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 хемиллюминесцентного озонметров // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15, № 8. С. 723–726.
 34. Dunlea E.J., Herndon S.C., Nelson D.D., Volkamer R.M., Lamb V.K., Alkwine 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. 163–3180.
 35. 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. Ozone vertical distribution in the troposphere over south regions of Western Siberia // Atmos. Ocean. Opt. 2011. V. 24, N 2. P. 181–187.
 36. Моисеенко К.Б., Штабкин Ю.А., Березина Е.В., Скороход А.И. Региональные фотохимические источники приземного озона в Европе и Западной Сибири // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2018. Т. 54, № 6. С. 645–658.
 37. Akritidis D., Pozzer A., Zanis P. On the impact of future climate change on tropopause folds and tropospheric ozone // Atmos. Chem. Phys. 2019. V. 19, N 22. P. 14387–14401.

38. Griffiths P.T., Keeble J., Shin Y.M., Abraham N.L., Archibald A.T., Pyle J.A. On the changing role of the stratosphere on the tropospheric ozone budget: 1979–2010 // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 46, N 10. DOI: 10.1029/2019GL086901.
39. Kalabokas P., Jensen N.R., Roveri M., Hjorth J., Ere-
menko M., Cuesta J., Dufour G., Foret G., Beek-
mann M. A study of the influence of tropospheric subsi-
dence on spring and summer surface ozone concentra-
tions at the JRC Ispra station in northern Italy // *At-
mos. Chem. Phys.* 2020. V. 20, N 4. P. 1861–1885.
40. Zhu X., Ma Z., Li Z., Wu J., Guo H., Yin X., Ma X.,
Qiao L. Impacts of meteorological conditions on noc-
turnal surface ozone enhancement during the summer-
time in Beijing // *Atmos. Environ.* 2020. V. 225.
117368.
41. *Гигиенический норматив ГН 2.1.6.3492-17 «Предельно
допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих ве-
ществ в атмосферном воздухе городских и сельских
поселений».* Постановление Главного Государственно-
го санитарного врача Российской Федерации № 165
от 22 декабря 2017 года (с изменениями на 31 мая
2018 г.).
42. *Гигиенический норматив ГН 2.2.5.3532-18 «Предельно
допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ
в воздухе рабочей зоны».* Постановление Главного Го-
сударственного санитарного врача Российской Феде-
рации № 25 от 13 февраля 2018 г.
43. Ari A. A comprehensive study on gas and particle emis-
sions from laser printers: Chemical composition and
health risk assessment // *Atmos. Pollut. Res.* 2020.
V. 11, N 2. P. 269–282.

V.V. Andreev, M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, D.K. Davydov, N.F. Elansky, G.S. Zhamsueva, A.S. Zaya-
khanov, G.A. Iolev, A.V. Kozlov, S.N. Kotel'nikov, I.N. Kuznetsova, V.A. Lapchenko, E.A. Lezina,
O.V. Postilyakov, D.E. Savkin, I.A. Senik, E.V. Stepanov, G.N. Tolmachev, A.V. Fofonov, I.V. Cheli-
banov, V.P. Chelibanov, V.V. Shiroto. **Surface ozone concentration over the Russian territory in the first
half of 2020.**

The review provides information on the ozone concentration in the surface air and troposphere in the first
half of 2020. The data were acquired at 13 stations in different Russian regions; vertical distributions were
obtained with the use of the aircraft laboratory. The excess over the Russian Federation hygienic standards was
assessed; the daily average maximum permissible ozone concentration is found to be regularly higher at most
stations. At some stations, there are features which differ the seasonal variations in the ozone concentration
in the period under study from previous years.