

УДК 551.510

РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРНОГО ОЗОНА И ЕГО ПРЕДШЕСТВЕННИКОВ В 2019–2022 гг.

© 2023 г. В. В. Андреев^a, О. Е. Баженов^b, Б. Д. Белан^b *, П. Н. Варгин^c, А. Н. Груздев^d,
Н. Ф. Еланский^d, Г. С. Жамсуева^e, А. С. Заяханов^e, С. Н. Котельников^f, И. Н. Кузнецова^g,
М. Ю. Куликов^h, А. В. Невзоров^b, В. А. Оболкинⁱ, О. В. Постыляков^d, Е. В. Розанов^j,
А. И. Скороход^{d, l}, А. А. Соломатникова^k, Е. В. Степанов^{a, f}, Ю. М. Тимофеев^j,
А. М. Фейгин^h, Т. В. Ходжерⁱ

^aРоссийский университет дружбы народов, ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198 Россия

^bИнститут оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, пл. Академика Зуева, 1, Томск, 634055 Россия

^cЦентральная аэрологическая обсерватория, ул. Первомайская, 3, г. Долгопрудный, Московской обл., 141701 Россия

^dИнститут физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, Москва, 119017 Россия

^eИнститут физического материаловедения СО РАН, ул. Сахьяновой, 6, Улан-Удэ, 670047 Россия

^fИнститут общей физики РАН им. А. М. Прохорова, ул. Вавилова, д. 38, Москва, 119991 Россия

^gГидрометецентр России, Большой Предтеченский пер., д. 11–13, Москва, 123242 Россия

^hИнститут прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН, ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950 Россия

ⁱЛимнологический институт СО РАН, ул. Улан-Баторская-3, Иркутск, 664033 Россия

^jСанкт-Петербургский государственный университет,

Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

^kГлавная Геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова, ул. Карбышева, 7, Санкт-Петербург, 194021 Россия

^lИнститут метеорологии и геофизики, Венский университет, Йозеф Холаубек Плац 2, Вена, 1090 Австрия

*e-mail: bbd@iao.ru

Поступила в редакцию 30.08.2023 г.

После доработки 07.11.2023 г.

Принята к публикации 15.11.2023 г.

Обзор содержит наиболее значимые результаты работ российских ученых в области исследований атмосферного озона, выполненных в 2019–2022 гг. В нем рассмотрены наблюдения за тропосферным озоном, его распределение и изменчивость на территории РФ, взаимосвязь с атмосферными параметрами, моделирование процессов образования и влияние на здоровье населения. Проанализировано также состояние стратосферного озона над Россией, моделирование процессов в озоносфере, разрабатываемые методы и приборы. Обзор является частью национального отчета России по метеорологии и атмосферным наукам, который был подготовлен для Международной ассоциации по метеорологии и атмосферным наукам (IAMAS). Отчет был рассмотрен и одобрен на XXVIII Генеральной Ассамблее международного геодезического и геофизического союза (IUGG).

Ключевые слова: атмосфера, озон, озоновый слой, состав атмосферы, малые газовые примеси, качество воздуха, химия озона, процессы переноса

DOI: 10.31857/S0002351523070027, **EDN:** TVUPBQ

1. ТРОПОСФЕРНЫЙ ОЗОН И ЕГО ПРЕДШЕСТВЕННИКИ

1.1. Наблюдения

Российская сеть мониторинга приземной концентрации озона (ПКО) и его предшественников частично изменилась за последние четыре года относительно предыдущего периода [Еланский, 2020].

По распределению обязанностей между ведомствами основную информацию о содержании озона в приземном слое воздуха должен предоставлять Росгидромет, который осуществляет мо-

нитинг его состава более чем в 240 городах России. Однако, в выпускаемых им ежегодно обзорах данные об озоне отсутствуют [Обзор, 2021; Обзор, 2022], хотя сеть в последние годы модернизируется.

В двух самых больших мегаполисах России – Санкт-Петербурге и Москве имеются сравнимые с зарубежными аналогами системы мониторинга приземного озона и других загрязняющих веществ. В г. Москва, с 2002 г. функционирует сеть экологического мониторинга Государственного природоохранного бюджетного учреждения (ГПБУ “Мосэкомониторинг”), специально упол-

номоченной организации по осуществлению государственного экологического мониторинга [<https://mosecom.mos.ru/>]. 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 времени. На сети станций Мосэкомониторинга в Москве измерения проводятся газоанализаторами трех видов работающих на основе метода ультрафиолетовой фотометрии: Casella Monitor ME 9810B, Environnement S.A. O3 42M, HORIBA Ltd APXA-370 мод. APOA-370 и 1 прибором OPSIS AB AR500, основанном на методе дифференциальной оптико-абсорбционной спектроскопии. Приборы внесены в Государственный реестр средств измерений и поверены в Государственной метрологической службе. В ежегодном докладе публикуются аналитические материалы о состоянии окружающей среды в городе Москве [<https://www.mos.ru/eco/documents/doklady/view/>], а также частично включаются в ежеквартальные обзоры [Иванова и др., 2019а, 2019б, 2019в, 2019г, 2020а, 2020б, 2020в, 2020г, 2021а, 2021б, 2021в, 2021г, 2022а, 2022б, 2022в, 2022г;].

На остальной территории РФ наблюдения за озоном проводятся в инициативном порядке в основном научными или вузовскими организациями. Сложившийся неформальный консорциум таких станций начал публиковать обзоры концентрации озона в тропосфере над территорией России [Андреев и др., 2020, 2021, 2022].

Согласно опубликованным в обзорах сведениям измерения в рассматриваемый период продолжались на Кисловодской высокогорной научной станции (КВНС); в Государственном природном заповеднике “Карадагский”; на 300-метровой вышке в Обнинске (Калужская область, НПО “Тайфун”); на 3 станциях в Санкт Петербурге: “ОРТЕС-N” расположенной в районе Александров-Невской Лавры, “ОРТЕС-P” – на Васильевском острове и “ОРТЕС-PR” базирующейся в Ленинградской области, на станции Громово Приозерского района; на станции мониторинга приземного озона, его предшественников и основных метеопараметров в Российском университете дружбы народов при участии Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН в пределах Третьего транспортного кольца по адресу улица Орджоникидзе, д. 3; на станции Вятские Поляны, расположенной на юге Кировской области; на TOR-станции и обсерватории Фоновая в Томской области; в г. Улан-Удэ. Затем к этим пунктам добавились станции Апатиты, Мурманская область; Боярский, Бурятия; в 2021 г. были восстановлены измерения на станции Листвянка, Иркутская область и Таруса, Калужская область, открыта станция ОПТЭК – Карелия. Станции оснащены сетевыми приборами, рекомендован-

ными Глобальной службой атмосферы (GAW WMO). Все приборы регулярно калибровались.

Кроме стационарных измерений проводились экспедиционные исследования озона и компонентов озоновых циклов, выполненные на территории оз. Байкал и прилегающей территории [Zayakhanov et al., 2019; Ходжер и др., 2019; Tsydyrov et al., 2020; Zhamsueva et al., 2021, 2022; Obolkin et al., 2022], а также в Арктическом регионе [Панкратова и др., 2020].

Вертикальное распределение в тропосфере измерялось с помощью самолета-лаборатории Tu-134 “Оптик”. Современный состав оборудования представлен в [Belan et al., 2022]. В течение всего рассматриваемого периода выполнялись ежемесячные полеты над южными районами Западной Сибири. В сентябре 2020 г. был проведен уникальный эксперимент по измерению состава воздуха, включая озон, над всеми морями Российского сектора Арктики. Еще один эксперимент был проведен в сентябре 2022 г. Он заключался в измерении состава воздуха в меридиональном направлении. Маршрут начался вблизи 56° с.ш. и закончился над акваторией Карского моря, где поддержку приводными измерениями осуществляло научно-исследовательское судно “Академик Мстислав Келдыш”.

Измерения вертикального распределения озона в верхней тропосфере – нижней стратосфере осуществлялись в Томске с помощью лазерного лидара (лидара) дифференциального поглощения. Лидар работает на длинах волн 299–341 и 308–353 нм и позволяет измерять вертикальное распределение озона в слое 5–45 км [Матвиенко и др., 2019].

В настоящее время регулярные измерения содержания двуоксида азота со спутников проводятся с помощью инструментов TROPOMI, OMI, GOME-2. Достигаемое ими горизонтальное пространственное разрешение при глобальном покрытии составляет десятки километров, что достаточно для исследования стратосферного NO₂. Коллективом ИФА РАН в 2016–2017 гг. были проведены первые эксперименты по высокочастотному зондированию тропосферного NO₂. При этом использовались измерения спектрометра ГСА, который устанавливается на космические аппараты серии Ресурс-П. На основе произведенной съемки разработан первый на мировом уровне алгоритм определения интегрального содержания NO₂ в тропосфере с пространственным разрешением около 2.4 км на сетке 120 м при типичной для спутниковых методов погрешности измерения 10¹⁵ молек/см². Для валидации крупномасштабных структур, выявляемых на восстановленных полях распределения NO₂, выполнены сравнения с данными аппаратуры TROPOMI и OMI [Postylyakov et al., 2019а, 2019б, 2020а, 2020б] и

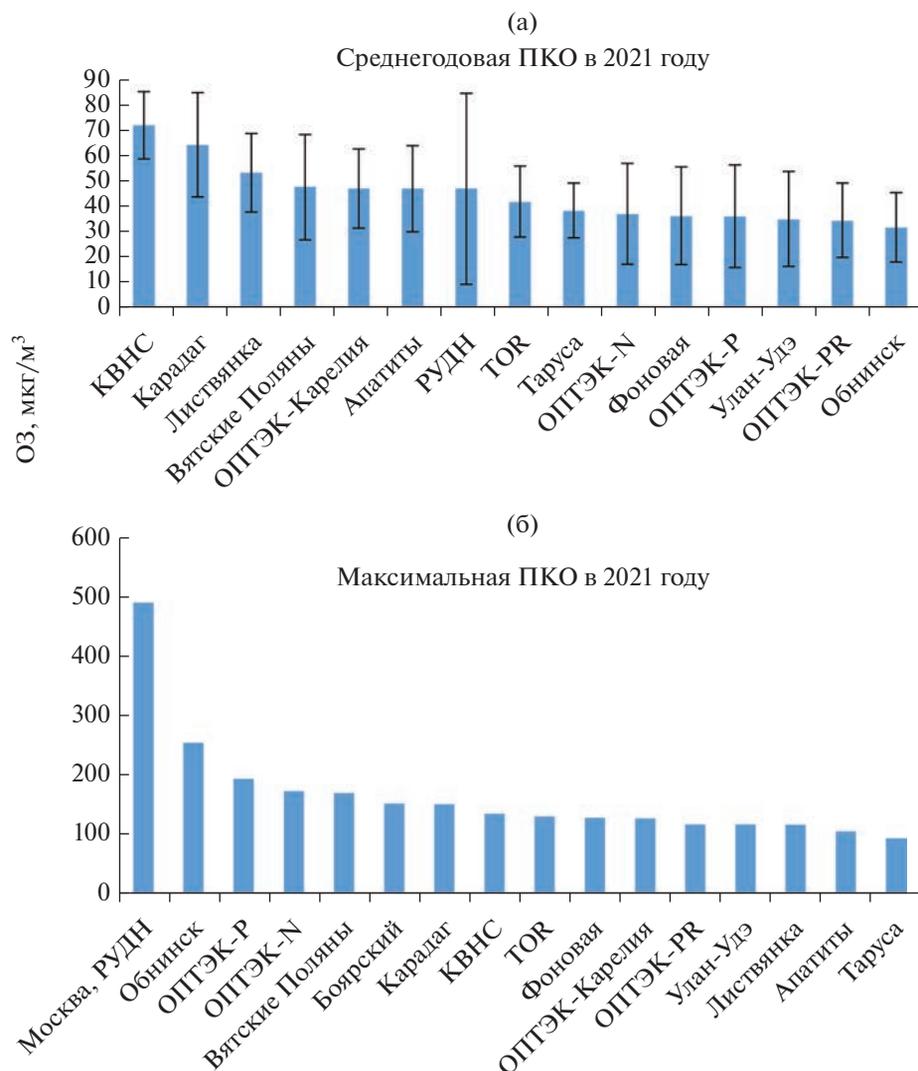


Рис. 1. Среднегодовая (а) и максимальная (б) концентрации озона в 2021 г. в России.

химико-транспортными моделями [Давыдова и др., 2021, Zakharova et al., 2021], которые подтвердили достоверность получаемых результатов.

1.2. Распределение и изменчивость

Данные, собранные в обзорах [Андреев и др., 2020, 2021, 2022], свидетельствуют о значительном разбросе в значениях концентрации озона в приземном слое воздуха в разных географических районах России. В качестве примера рассмотрим рисунок, на котором представлены среднегодовая и максимальная концентрации озона в 2021 г.

Из рис. 1а видно, что среднегодовые значения ПКО различаются между собой в 2.5 раза. Наибольшие значения фиксируются на высокогорной станции в Кисловодске, в Крыму и на берегу оз. Байкал, наименьшие — на городской станции в Обнинске.

Максимальные же концентрации (рис. 1б), наблюдаются в крупных городах, где имеются дополнительные выбросы газов-предшественников озона. При этом и порядок распределения станций изменяется.

Из рисунка 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 4 раз [Антохин и др., 2010]. Для ответа на этот вопрос требуется отдельное исследование.

В статье [Андреев и др., 2022] был выполнен подробный анализ причин высоких среднегодовых концентраций на КВНС. Для этого сделан траекторный анализ приходивших на КВНС воз-

душных масс. Методика расчета 7-суточных обратных траекторий описана в обзоре [Андреев и др., 2021]. Из-за пропусков в измерениях 2021 г. по техническим причинам, было смоделировано меньше траекторий, чем в 2020 г., — около 17000 траекторий. 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 значения концентрации озона связаны не столько с дальним переносом, сколько с сухим осаждением на земной поверхности. Наиболее активно 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 г. Кисловодска (высота над уровнем моря 750–850 м) в дни с благоприятными для развития горнодолинной циркуляции условиями, как было показано в [Сеник и др., 2005], приводит, наоборот, к увеличению дневного максимума озона, но очень незначительному. Кроме того, снижению концентрации озона способствуют туманы. В связи с этим из анализа были исключены обратные траектории для дней, характеризующихся высокой влажностью (более 80%) в конечной точке траектории на КВНС. Полученные результаты свидетельствуют, что экстремально высокие аномалии приземного озона на КВНС были связаны с переносом воздуха с южных направлений, экстремально низкие значения — с переносом воздуха с северо-западных направлений.

Анализ особенностей генерации озона в районе Карадага был выполнен в цикле работ [Шалыгина и др., 2019; Лапченко и др., 2022; Федорова и др., 2022; Борисов и др., 2022]. Установлено, что наиболее высокие ПКО наблюдаются в сухую жаркую погоду и имеют адвективную природу. Траекторный анализ показал, что весной движение воздушных масс происходит над акваторией Черного моря со стороны Украины, Турции, Румынии и Болгарии; в летние месяцы над территорией суши и в основном со стороны Украины и южных районов России. На режим ПКО также существенное влияние оказывает бризовая циркуляция, в ночное время — склоновые ветры.

В статье [Obolkin et al., 2022] анализируются особенности динамики озона в семи городах Байкальского региона (юго-восток Сибири). Выявлено, что существенные различия пространственно-временной изменчивости среднесуточных концентраций озона зависят от различных антропогенных нагрузок. В крупных городах с тяжелой промышленностью, расположенных в долине реки Ангары, концентрации озона были минимальными и мало изменялись в течение года: менее 5 мкг/м³ в г. Ангарске и 20–30 мкг/м³ в

г. Иркутске. В населенных пунктах менее загрязненного района, долины реки Селенги, концентрации озона были значительно выше, а годовая изменчивость озона типична для Восточной Сибири: максимум весной (60–70 мкг/м³), минимум осенью и зимой (от 10 до 30 мкг/м³). Максимальные концентрации озона наблюдались в сельских условиях (ст. Листвянка, западное побережье Южного Байкала), до 80–100 мкг/м³ в период весеннего максимума.

По результатам наблюдений на ЗНС ИФА РАН и в ИОА СО РАН (г. Томск) получены оценки временной изменчивости интегрального содержания формальдегида Н₂СО в нижней тропосфере [Бручковский и др., 2019]. Показано существование статистически значимого положительного тренда интегрального содержания формальдегида в зависимости от температуры при $T > 5^{\circ}\text{C}$ в обоих пунктах. Наблюдаемый положительный тренд, по-видимому, связан с ростом биогенных выбросов изопрена и других неметановых ЛОС с ростом температуры, а также площадей лесных и торфяных пожаров. В воздушных массах, приходящих на ЗНС из Москвы, наблюдается устойчивое превышение ИС формальдегида в среднем на $0.4 \pm 0.1 \times 10^{16}$ мол/см² при положительных температурах и на $0.8 \pm 0.2 \times 10^{16}$ мол/см² при отрицательных температурах. Несмотря на значительную удаленность от Москвы, наблюдаемые на ЗНС значения в целом на 10% выше наблюдаемых в Томске.

1.3. Роль атмосферных процессов и явлений в изменении озона

В работе [Антохин др., 2020] исследовалась взаимосвязь между изменениями концентрации СН₄, СО, СО₂, NO, NO₂, О₃, SO₂ и счетной концентрации аэрозолей с диаметром частиц более 0.4 мкм и следующими метеовеличинами: температурой воздуха, атмосферным давлением, направлением и скоростью ветра, суммарной солнечной радиацией и ультрафиолетовой радиацией в диапазоне 295–320 нм, относительной влажностью и упругостью водяного пара. Для исследования использовались данные мониторинга состава воздуха (за период 1993–2018 гг.), осуществляемого на TOR-станции, расположенной в районе Томского Академгородка. На основе среднемесячных данных установлено, что у озона имеется значимая положительная или отрицательная корреляция почти со всеми анализируемыми метеовеличинами, за исключением направления ветра. Высокие значения отрицательной связи концентрации углекислого газа зафиксированы с солнечной и УФ-В радиацией, температурой воздуха и упругостью водяного пара. У диоксида азота, помимо положительной зависимости с атмосферным давлением,

фиксируется две значимых отрицательных связи с температурой воздуха и скоростью ветра. Атмосферный аэрозоль, также как и газовые примеси воздуха, имеет устойчивую положительную связь с давлением воздуха и отрицательные связи с солнечной радиацией, УФ-В радиацией, температурой воздуха и упругостью водяного пара. Не выявлено значимых связей метеовеличинс такими компонентами как SO_2 , CO и NO .

Авторами [Котельников и др., 2019] исследовалась влияние водного аэрозоля на содержание озона в атмосферном воздухе. В натуральных экспериментах резкое снижение содержания озона в приземной атмосфере наблюдалось во время кратковременного ливневого дождя в мегаполисе. Процесс разложения озона в присутствии воды был также изучен в лабораторных условиях в реакционной камере. Показано, что разложение озона в воздухе ускоряется при высоких значениях относительной влажности, а также в присутствии водного аэрозоля. Скорость деструкции озона зависит от размера аэрозоля — чем мельче частицы, тем выше скорость разложения. Это может свидетельствовать о существенной роли процессов гетерогенного связывания на поверхности аэрозоля. В [Аршинова и др., 2019] такой устойчивой взаимосвязи не обнаружено. Проведенное исследование показало, что при атмосферных осадках может происходить и рост и падение приземной концентрации озона независимо от их вида, интенсивности и района измерений. Наибольшие изменения связаны с фронтальными осадками и отражают “скачок” концентраций при смене воздушных масс. Во внутримассовых осадках знак изменения содержания озона зависит от периода суток, в который они выпадали. Если осадки наблюдаются на волне роста в суточном ходе O_3 , то в большинстве случаев это приводит к увеличению содержания озона. Если осадки выпадают на волне уменьшения в суточном ходе, то регистрируется падение содержания озона.

В работе [Белан и др., 2019] исследовалась роль абсолютной влажности в образовании озона. Проведенный анализ выявил нейтральную зависимость при положительных температурах и неожиданно большую и знакопеременную изменчивость при отрицательных температурах. Абсолютная влажность оказывает отрицательное влияние на образование озона в приземном слое воздуха, вызывая уменьшение его концентрации при температурах $0\dots-30^\circ\text{C}$. При очень низких температурах ($<$ ниже минус 30°C), эффект изменяется на положительный, со значительным увеличением вклада абсолютной влажности.

Работа [Khuriganova et al., 2022] посвящена исследованию роли солнечной радиации в фотохимической генерации приземного озона. Согласно представленным данным, она начинается утром при достижении интенсивности радиации более

200 Вт/м^2 и продолжается до тех же значений вечером, поэтому максимум озона обычно запаздывает по отношению к дневному максимуму солнечной радиации на несколько часов.

Авторами [Berezina et al., 2020, 2022] проанализированы вклад CO и 15 летучих органических соединений (ЛОС) в образование озона в приземном слое воздуха летом 2011–2013 гг. в Москве. Наибольшая концентрация O_3 наблюдалась в дневные периоды в антициклонических метеорологических условиях, при слабом перемешивании пограничного слоя атмосферы и высоких температурах (до 210 мкг/м^3). Напротив, содержание NO_x , CO и бензола уменьшалось с 8 утра до 17–18 часов вечера по местному времени. Высокая положительная корреляция дневного O_3 со вторичными ЛОС подтвердила важную роль фотохимического производства O_3 в Москве. Основным источником антропогенных ЛОС в Москве были местные выбросы от транспортных средств. Тем не менее, только около 5% наблюдаемого изопрена было отнесено к антропогенным, что свидетельствует о значительном вкладе биогенных источников в общие уровни прекурсоров озона. Была проведена оценка вклада различных антропогенных и биогенных ЛОС в измеренные значения озона. Озонообразующий потенциал (ОП) общего количества ЛОС составлял в среднем $31\text{--}67 \text{ мкг/м}^3$ и превышал 100 мкг/м^3 в 10% событий с высоким содержанием озона, достигая 136 мкг/м^3 . Такие газы как ацетальдегид, 1,3-бутадиен и изопрен имеют самый высокий потенциал производства озона в Москве по сравнению с другими измеренными ЛОС.

В [Moiseenko et al., 2021] рассматриваются условия образования озона вблизи 300 м башни в Зотино. Высокие уровни O_3 и NO_x наблюдаются здесь в воздухе, поступающем из промышленных районов Западной Сибири и Уральских гор, тогда как фоновый воздух поступает из отдаленных районов Северной Евразии в пределах $55^\circ\text{--}70^\circ$ северной широты. Озон в континентальном воздухе имеет отчетливый максимум в апреле, как и в средних широтах Северного полушария. Весной и в начале лета в жарких погодных условиях региональные антропогенные и выбросы лесных пожаров являются важным источником озона в континентальном пограничном слое над южной и центральной Сибирью. В течение оставшейся части года центральная Северная Евразия представляет собой поглотитель тропосферного озона в масштабах полушария.

Основываясь на масштабных измерениях озона и компонент его цикла, в [Thorp et al., 2021] оценивается влияние двух доминирующих секторов антропогенных выбросов (транспорт и энергетика) и растительных пожаров на приземные концентрации NO_x и O_3 над Сибирью и российской Арктикой. Полученные результаты говорят

о том, что региональный озон более чувствителен к антропогенным выбросам, особенно в транспортном секторе, и вклад выбросов от пожаров наблюдается в июне и в значительной степени ограничен широтами к югу от 60° с.ш.. Воздействие пожаров на сухое осаждение озона в пределах региона невелико по сравнению с антропогенными выбросами и незначительно к северу от 60° с.ш. Эти результаты свидетельствуют о том, что приземный озон в регионе контролируется взаимодействием между сезонностью в моделях атмосферного переноса, сухим осаждением на растительности и доминированием выбросов в транспортном и энергетическом секторах.

Работа коллектива авторов [Ракитин и др., 2021] посвящена исследованию долговременной изменчивости общего содержания (ОС) оксида углерода, как одного из прекурсоров озона и метеопараметров. В ней также получены характеристики накопления в штилевые дни в пограничном слое атмосферы оксида углерода в Московском мегаполисе. Установлено убывание среднегодовых величин ОС СО в 2000–2018 гг. в Москве ($-2.56 \pm 0.52\%/год$) и на ЗНС ($-1.15 \pm 0.37\%/год$). Однако скорость убывания в обоих пунктах в разные сезоны и периоды различна. После 2007–2008 г. скорость убывания ОС СО уменьшилась в обоих пунктах. В период 2008–2018 гг. на ЗНС зафиксирован рост ОС СО в летние и осенние месяцы со скоростью около $0.7\%/год$. Наблюдается увеличение скорости ветра в атмосферном пограничном слое Москвы в разные периоды 2000–2018 гг. со скоростью 0.4 – $1.6\%/год$. При этом в Калужской области не обнаружено статистически значимых ее изменений. Повторяемость штилевых дней в Москве в период 2006–2017 гг. снижалась ($-7.06 \pm 3.96\%/год$) при уменьшении антропогенной части содержания СО в этот же период ($-6.72 \pm 3.48\%/год$). Полученные результаты свидетельствуют о влиянии климатического (метеорологических) факторов на качество воздуха в Москве, включая озон.

В работе [Zayakhanov et al., 2019] изучалось сухое осаждение озона в Прибайкальском регионе. На основе метода вихревой ковариации и градиентных, включая метод аэродинамического градиента, модифицированный метод Боуэна и метод модифицированного градиента, опираясь на экспериментальные данные, были получены для различных сред (луга, лес) количественные оценки потоков и сухого осаждения озона на подстилающей поверхности. Средние значения скорости сухого осаждения озона были равны 0.37 см/с в ночное время (0–3 ч) и 0.91 см/с в дневные часы (12–18 ч). Поток озона составлял 0.24 мкг $m^{-2} c^{-1}$ ночью и 0.72 мкг $m^{-2} c^{-1}$ днем. Количественные оценки показывают более высокую поглотительную способность лесов по сравнению с почвенной растительностью.

Недельный цикл и влияние выходных дней на концентрации O_3 , NO , NO_2 , CO , CH_4 , SO_2 , $NMHC$ и PM_{10} были исследованы в московском мегаполисе с использованием натуральных измерений с 1 января 2005 г. по 31 декабря 2014 г. на 49 станциях Московской сети мониторинга окружающей среды [Elansky et al., 2019]. Суточный цикл O_3 характерен для крупных городов. В будние дни его предрассветная минимальная концентрация наблюдается в 7:30, а максимальная – в 15:00–16:00. В выходные дни предрассветный минимум отсутствует, так как в это время сниженные выбросы NO на дорогах ослабляют разрушение озонового слоя. Суточные колебания концентраций CO , NO_x , $NMHC$ и PM_{10} зависят главным образом от выбросов автотранспорта и вертикальной стратификации пограничного слоя атмосферы. Характерной особенностью Москвы является совпадение часов пик по времени и инверсия температуры поверхности в холодное время года, что приводит к накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы. Было обнаружено, что приземные концентрации загрязняющих веществ (за исключением озона и метана) снижаются по выходным. Будний день (вторник–пятница)–воскресенье различия в дневных концентрациях (08:00–22:00 LT) NO , NO_2 , CO , SO_2 , $NMHC$ и PM_{10} относительно концентраций в будний день, усредненных по всем станциям за 2005–2014 гг., составили 23.9 ± 5.8 , 16.7 ± 2.8 , 13.6 ± 3.3 , 7.6 ± 6.5 , 6.3 ± 2.2 и $14.5 \pm 5.1\%$ соответственно. Концентрация озона увеличилась в воскресенье на $16.5 \pm 4.8\%$. Концентрация метана в выходные была такой же, как и в будние дни. Воздействие выходных дней на все концентрации загрязняющих веществ было ослаблено в пределах зеленой зоны вокруг Москвы. В разных секторах Москвы воздействие загрязняющих веществ в выходные дни, за исключением SO_2 , было примерно одинаковыми. Вертикальная структура выходных эффектов NO , NO_2 и CO была проанализирована на основе данных, полученных в результате измерений на телебашне высотой 500 м. Эти эффекты выходного дня нелинейно уменьшались с высотой. Оценки, полученные для основных критериев активности фотохимических процессов, определяющих формирование недельного цикла и влияние озона в выходные дни (отношение $NMHC/NO_x$, доля потерь радикалов в результате химического воздействия NO_x , концентрация O_x), показывают, что химический состав с ограниченным содержанием ЛОС характерен для Москвы.

1.4. Аномалии и экстремальные события

Несомненно, экстремальным событием в рассматриваемый период явилась пандемия коронавируса COVID-19. В [Skorokhod et al., 2022] были

исследованы изменения состава атмосферы в разные периоды 2020 г. в Москве, связанные с мероприятиями по предотвращению пандемии и соответствующим уменьшением выбросов загрязняющих веществ. Приземные концентрации диоксида азота NO_2 , оксида углерода CO , озона O_3 , аэрозольной фракции PM_{10} и метеорологические параметры в разные периоды 2020 г. сопоставлены с аналогичными данными за 5 предшествующих лет. Анализ данных наземных измерений, а также спутниковых данных высокого разрешения о распределении CO и NO_2 свидетельствует о том, что на содержание основных загрязняющих веществ и его пространственное распределение в Московском регионе существенно повлияли как ограничительные меры, так и аномальные метеорологические условия 2020 г.

В [Степанов и др., 2022] представлены результаты мониторинга приземного озона в атмосфере Москвы в 2020 и 2021 гг. в условиях строгих ограничений, связанных с пандемией COVID-19. Эти два года существенно различались метеорологическими условиями и уровнем антропогенной нагрузки на окружающую среду. В 2020 г. в Москве наблюдался относительно низкий для мегаполиса уровень приземных концентраций O_3 . Среднегодовое значение составило 28 мкг/м^3 , а максимальное за год — 185 мкг/м^3 . Это обусловлено сочетанием относительно прохладной летней погоды с низким содержанием загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Летом 2021 г. наблюдались волны сильной жары в условиях блокирующего антициклона, дневные температуры поднимались до 35°C . В сочетании с более высокой загрязненностью атмосферного воздуха это стало причиной необычно высоких концентраций O_3 . Среднегодовое значение составило 48 мкг/м^3 , а максимальное годовое — 482 мкг/м^3 .

При этом, в средней полосе России весной 2020 г. зафиксированы аномально низкие концентрации озона в приземной атмосфере [Котельников и др., 2021]. Обычный для весны рост содержания озона, обусловленный сезонным повышением температуры и освещенности, сменился монотонным падением. Усредненные за месяц максимальные суточные значения наблюдаемых величин в апреле 2020 г. были в 3 раза меньше величин, зафиксированных в это же время в 2019 г. Наблюдалось как снижение региональных фоновых концентраций озона в приземной атмосфере, так и уменьшение интенсивности фотохимического его образования. Наиболее вероятной причиной наблюдавшегося явления авторы считают уменьшение выбросов в атмосферу продуктов горения в Китае, Европе и России, обусловленное введением особых режимов в связи с пандемией COVID-19.

1.5. Моделирование процессов образования и трансформации ПКО

В работах [Штабкин и др., 2019, 2020а, 2020б] проведены расчеты чувствительности поля O_3 к величинам суммарных эмиссий предшественников озона с помощью глобальной транспортно-химической модели GEOS-Chem с использованием баз данных по антропогенным (EDGAR) и биогенным (MEGAN, GFED) эмиссиям за 2007–2012 гг. с применением редуцированного подхода. Получены подробные количественные оценки влияния отдельных факторов, определяющих сезонные вариации приземного содержания озона в Центральной Сибири. Количественная оценка антропогенного и биогенного сигналов в измеренных концентрациях O_3 проведена с использованием глобальной химико-транспортной модели GEOSChem с учетом всех основных источников и стоков данного соединения. Исследовано влияние климатически значимых региональных источников эмиссий окислов азота ($\text{NO}_x \equiv \text{NO} + \text{NO}_2$), CO и биогенных летучих органических соединений (ЛОС) на фотохимическую генерацию приземного озона (O_3) в регионах Европы и Сибири. Получено, что величина фотохимической наработки озона в летние месяцы хорошо коррелирует с возрастом воздушной массы, устанавливаемым по отношению к суммарному реактивному азоту, при среднем вкладе региональных источников $\sim 10\text{--}15 \text{ млрд}^{-1}$. Полученные количественные оценки величины эффективности производства находятся в хорошем соответствии с выводами фотохимической теории тропосферного озона для условий слабо загрязненного воздуха.

Работы [Berezina et al., 2019; Safronov et al., 2019] посвящены оценке относительной важности изопрена и монотерпенов в формировании приземного озона в российских городах вдоль Транссибирской магистрали. Для этого был рассчитан потенциал его формирования в дневное время (ОФП). Расчетные ОФП по изопрену и монотерпенам вдоль Транссибирской магистрали составляют в среднем 15 ± 13 и $18 \pm 25 \text{ млрд}^{-1}$ озона, соответственно. В большинстве городов вдоль Транссибирской магистрали, где наблюдалась высокая концентрация NO_x ($10\text{--}20 \text{ млрд}^{-1}$) наряду с высокими дневными температурами ($>25^\circ\text{C}$), основной вклад в формирование тропосферного озона внесли монотерпены. Только в дальневосточных городах, где произрастает крупнейшая листовая растительность Транссибирской магистрали, изопрен играл главную роль в формировании тропосферного озона.

По измерениям концентраций озона и оксидов азота на высотной мачте ZOTTO (Zotino Tall Tower Observatory) в Центральной Сибири проведены оценки скоростей генерации (Р и разрушения (L) озона, а также содержания пероксидных

радикалов (ОХ) с использованием фотостационарного приближения [Моисеенко и др., 2019, 2022]. Максимумы суточного хода рассматриваемых величин приходятся на период с 11:00 до 15:00 местного времени и составляют ~ 6 млрд⁻¹/ч (Р), 1.4 млрд⁻¹/ч (L) и 115 трлн⁻¹ ([ОХ]). В диапазоне измеренных концентраций NO_x от 0.2 до 0.8 млрд⁻¹ имеет место линейная зависимость Р от [NO_x], соответствующая NO_x-лимитирующему производству озона, с коэффициентом пропорциональности $P(O_3)/[NO_x] \sim 13$ (млрд⁻¹/ч)/млрд⁻¹. Высокое содержание пероксидных радикалов наряду с условием $P \gg L$ свидетельствует о процессах интенсивного окисления биогенных летучих органических соединений и фотохимической генерации озона. Полученные оценки выявляют значимую роль региональных эмиссий NO_x в балансе приземного озона и необходимость учета данного фактора при прогнозировании экологических рисков в регионах Сибири, традиционно относящихся к экологически чистым.

В серии публикаций [Borovski et al., 2019, 2020; Postulyakov et al., 2020; Пономарев и др., 2020] исследуется согласие результатов химически-транспортного моделирования NO₂ с использованием моделей SILAM и COSMO-ART в московском регионе и измерениями методом ДОАС. В работе [Пономарев и др., 2020] на основе сравнений моделирования с наблюдаемыми приземными концентрациями и ИС, определяемыми методом ДОАС, предложены корректировки пространственного распределения и мощности источников в г. Москве с целью улучшения модельных оценок качества воздуха в Москве.

Работы [Пономарев и др., 2019; Elansky et al., 2020; Ponomarev et al., 2021; Локощенко и др., 2021; Zakharova et al., 2022; Еланский и др., 2022] были посвящены уточнению источников эмиссий прекурсоров образования озона. Для оптимизации пространственного распределения источников и величины эмиссий в Московском мегаполисе проведены вычисления полей озона и других примесей для летнего и зимнего месяцев по химико-транспортным моделям SILAM и COSMO-ART с использованием как рассчитанных, так и взятых из базы данных инвентаризации ТНО эмиссий. Сравнение данных наблюдений, полученных в Московской сети экологического мониторинга (МЭМ), с результатами численного моделирования на основе использования химико-транспортной модели SILAM показало, что ошибки при определении концентраций озона и других веществ в городской атмосфере имеют более сложную структуру, чем те, которые предполагаются при использовании обычных алгоритмов ассимиляции данных.

В ФГБУ “Гидрометцентр России” проводятся работы по созданию и усовершенствованию тех-

нологии прогнозирования концентраций загрязняющих веществ на основе химических транспортных моделей (ХТМ), включая озон [Кузнецова и др., 2022; Нахаев и др., 2021]. На начальном этапе была реализована технология расчетов с использованием химической модели открытого дотупа CHIMERE с усвоением данных модели WRF-ARW. На следующем этапе организовано обеспечение расчетов по ХТМ CHIMERE данными численной модели атмосферы COSMO-Ru07, что позволило обеспечить устойчивость и оперативность счета. Благодаря вычислительной модернизации и развитию численной модели атмосферы сегодня в экспериментальном режиме по ХТМ CHIMERE-COSMO-Ru2,2 проводятся расчеты полей концентраций загрязняющих веществ для части центрально-европейского региона России (36.6–44.2° в.д. и 55.1–56.5° с.ш.). Также на сетке с горизонтальным шагом 2 км для Московского региона выполняются расчеты ХТМ COSMO-Ru2.2-ART (COntortium for Small-scale MOdeling). Специфической особенностью COSMO-Ru2.2-ART (в отличие от ХТМ CHIMERE) является совместный расчет метеорологических величин и химических преобразований на каждом шаге по времени, что позволяет учитывать обратное влияние аэрозолей и газов на радиационные процессы и метеорологический режим атмосферы. Важнейшим звеном функционирующей автоматизированной технологии прогнозирования качества воздуха на основе двух ХТМ CHIMERE-COSMO-Ru2,2 и COSMO-Ru2.2-ART является верификация моделей по данным наблюдений за загрязнением. Верификация показала завышение концентраций ХТМ CHIMERE и их занижение COSMO-ART; обе ХТМ преимущественно недооценивают загрязнение на территориях транспортного типа. Коэффициент корреляции (R) между модельными и измеренными средними концентрациями NO₂ и CO составил 0.6–0.7, по расчетам концентрации O₃ ХТМ CHIMERE $R = 0.7–0.8$, COSMO-Ru2ART $R = 0.4–0.5$. Выявлена сезонная изменчивость модельных отклонений со сменой знака для каждой модели и каждого загрязняющего вещества; наибольшие модельные отклонения наблюдались при аномальных погодных условиях – во время волн жары летом и при адвекции запыленного воздуха весной. С учетом установленных модельных ошибок каждой ХТМ сформулированы рекомендации для составления оперативного консолидированного прогноза с использованием комплексирования расчетов двух ХТМ.

1.6. Озон и здоровье

Увеличение содержания озона в приземном воздухе, обусловленное изменениями глобального климата и ростом загрязнения атмосферы, может приводить к повышению заболеваемости и

смертности населения. Авторами [Котельников и др., 2019] исследована связь аномально высоких ПКО в г. Москва с заболеваемостью и смертностью в различных возрастных группах населения летом 2010 г. и с частотой сердечно-сосудистых заболеваний и смертностью в малоурбанизированном районе на юге Кировской области. Показано, что в группах мужчин и женщин в возрасте 31–60 лет и старше наблюдается статистически достоверная связь, а в соответствующих возрастных группах 15–30 лет такая связь отсутствует. На юге Кировской обл. при превышении среднесуточной предельно допустимой концентрации озона (ПДКсс) в течение нескольких суток достоверно увеличилась частота вызовов бригад скорой помощи, связанных с сердечно-сосудистыми заболеваниями. Это подтверждает обоснованность установления отечественного стандарта ПДКсс для озона равного 30 мкг/м³.

Они же предположили [Ивашкин и др., 2020], что в период COVID-19 при попадании в вдыхаемый воздух в организм озон может пагубно действовать на основные системы организма — сердечно-сосудистую, нервную, респираторную и иммунную. В частности, как сильный окислитель, он вызывает образование в респираторном тракте свободных радикалов, провоцирующих перекисное окисление липидов, подавляющих иммунитет.

Дальнейшие исследования показали [Степанов и др., 2022], что летом 2021 г. в Москве наблюдалось редкое сочетание распространения очередной волны инфекции SARS-CoV-2 (штамм дельта) и метеорологических условий, способствующих образованию аномально высоких приземных концентраций озона. Помимо высокой частоты заражений в это время в Москве была зафиксирована и самая высокая за время пандемии смертность, обусловленная этим вирусом. Коэффициенты корреляции между частотой заражений и смертности с концентрацией приземного озона составили ~ 0.59 ($p < 0.01$) и ~ 0.60 ($p < 0.01$), соответственно. Наблюдаемая корреляция может быть обусловлена сочетанным патологическим действием на органы дыхания и кровообращения высоких концентраций озона и вируса SARS-CoV-2, которое может приводить как к более легкой передаче инфекции, так и к более тяжелому течению заболевания и повышению смертности.

В работе [Stepanov et al., 2019], эта же научная группа обращает внимание на тот факт, что наблюдающиеся на территории России приземные концентрации озона значительно превышают пороги отрицательного воздействия на растительность.

2. СТРАТОСФЕРНЫЙ ОЗОН

2.1. Наблюдения

Для контроля общего содержания озона (ОСО) в России создана и функционирует Госу-

дарственная система мониторинга. ГГО продолжает обеспечение работы наземной озонметрической сети Росгидромета. Наблюдения на 28 станциях ведутся с 1973 г. Многолетние ряды данных позволяют производить анализ пространственной и временной изменчивости и выявлять взаимосвязь аномалий в поле ОСО с общей циркуляцией нижней стратосферы и верхней тропосферы. Результаты оценки долговременных изменений толщины защитного озонового слоя, основные тренды и тенденции, а также современное состояние представлены в ежегодных “Обзорах состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации” [Соломатникова и др., 2020, 2021, 2022a, 2022b]. Отдельно проводится анализ для станций Арктического региона. На 12 станциях продолжают измерения эритемной УФ радиации. Значительную роль в обеспечении наземных измерений играет калибровка измерительной аппаратуры. Привязка приборов к мировой шкале осуществляется путем регулярных калибровок по эталону озонметрической сети Росгидромета (Спектрофотометр Добсона № 108).

Продолжаются работы по переоснащению озонметрической сети Росгидромета. В ходе опытной эксплуатации спектрометров УФОС, предназначенных для комплексных измерений спектрального состава суммарной УФР и общего содержания озона, усовершенствованы программное обеспечение, методы калибровки и расчета ОСО. По нескольким приборам накоплены ряды параллельных наблюдений с озонметрами М-124, демонстрирующие удовлетворительную согласованность и однородность рядов. В 2022г. изготовлены зенитные спектрометры для измерений ОСО, предназначенные для эксплуатации в регионах с тяжелыми климатическими условиями. В 2023 г. начинаются их испытания.

В 2022 г. сотрудниками ГГО и ААНИИ начаты совместные работы по организации сети регулярных автоматических наблюдений УФ радиации с высоким временным разрешением на полярных станциях (Арктика и Антарктика) и научно-исследовательских судах ААНИИ. Ежегодно пополняется массив данных об ОСО, поступающий с российских антарктических станций Мирный, Новолазаревская и Восток и с научно-экспедиционных судов ААНИИ. До начала 2000-х гг. на антарктических станциях отмечалась устойчивая тенденция уменьшения общего содержания озона антарктической весной. В настоящее время наблюдается тенденция возвращения содержания озона к значениям, характерным для периода, предшествующего проявлению эффекта озоновой дыры [Сибир и др., 2020].

Продолжаются наблюдения интегральной оптической плотности атмосферы (ОПА), начатые в 1970-х годах. Результаты анализа данных представ-

лены в ежегодных “Обзорах состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации” [Русина и др., 2022а, 2022б]. Характер межгодовой изменчивости ОПА позволяет проследить последствия мощных вулканических извержений, периоды самоочищения атмосферы, сокращения промышленной активности в постперестроечные годы, снижения оптического замутнения атмосферы. С начала 2000-х гг. наблюдается относительно спокойное состояние атмосферы, статистически значимых трендов оптической плотности атмосферы не зарегистрировано.

Также продолжают наблюдения аэрозольной оптической толщины атмосферы в Антарктиде. Значения, получаемые по результатам прямых спектральных солнечных фотометрических измерений, и интегральная оптическая толщина, определяемая по данным стандартных актинометрических наблюдений за прямой солнечной радиацией, являются показателями оптического состояния атмосферы. Сопоставление полученных данных с оценками для других природных регионов и условий свидетельствует о том, что в периоды без влияния вулканических извержений уровни аэрозольного замутнения атмосферы в Антарктиде на протяжении последних десятилетий являются минимальными на планете и могут рассматриваться в качестве глобальных фоновых характеристик [Радионон В.Ф. и др., 2020].

С учетом ощутимых изменений климата на планете в целом, особую роль приобретают базы и архивы данных основных климатообразующих характеристик атмосферы, собранных за длительные периоды времени в различных районах земного шара и, в частности, в полярных областях. Суммарная солнечная радиация входит в число важнейших параметров, влияющих на энергетический баланс системы Земля – атмосфера. В статье [Сибир и др., 2021] приведено описание созданной базы данных (БД) часовых и суточных сумм суммарной радиации на российских станциях Антарктиды. БД предназначена для исследования радиационного режима Антарктики с начала актинометрических наблюдений и до настоящего времени. Она прошла процедуру государственной регистрации и зарегистрирована под № 2020621401. На основе содержащейся в ней информации были получены оценки характеристик изменчивости суточных, месячных и годовых сумм суммарной радиации на станциях Беллинсгаузен, Восток, Мирный, Новолазаревская и Прогресс за весь период наблюдений по 2019 г. Результаты их анализа свидетельствуют об отсутствии существенных изменений в поступлении суммарной солнечной радиации на антарктическую поверхность за более чем шестидесятилетний период актинометрических наблюдений.

В предыдущие годы, по инициативе озоновой комиссии ВМО, на станциях КВНС, Обнинск и Томск, оснащенных спектрофотометрами Брюера, проводились наблюдения общего содержания озона. Данные, полученные на этих станциях, регулярно передавались во Всемирный центр данных по озону и ультрафиолетовому солнечному излучению WOUDC. Спектрофотометры регулярно калибровались с использованием мобильного стандарта спектрофотометра Брюера № 17 [Dorokhov et al., 2015]. Из-за политических мотивов очередная калибровка не состоялась. Поэтому надежность получаемых сейчас данных под вопросом.

Помимо Государственной и международной сетей исследование ОСО и компонентов озоновых циклов проводилось на территории России в учебных и научных организациях СПбГУ, ИФА РАН, ИОА СО РАН и др.

Так, в СПбГУ на кафедре физики атмосферы и в лаборатории исследования озонового слоя и верхней атмосферы для изучения пространственно-временной изменчивости осуществляются измерения озона с использованием спутниковой и наземной аппаратур. Проводится усовершенствование методов обработки информации. В работах [Поляков и др., 2019; Тимофеев и др., 2021; Polyakov et al., 2020] предложен оригинальный алгоритм решения обратной задачи для получения общего содержания озона из спектров, измеренных Фурье-спектрометром ИКФС-2 на российском спутнике Метеор-М № 2. Алгоритм основан на использовании метода искусственных нейронных сетей, метода главных компонент и измерений ОСО прибором OMI на спутнике Aura. Погрешность определения ОСО составляет около 3%, метод позволяет анализировать глобальное распределение ОСО, в том числе, и в отсутствие солнечного излучения, например, в период полярных ночей. Авторы применили методику дифференциальной спектроскопии DOAS при интерпретации результатов измерений наземного ультрафиолетового озонного спектрометра УФОС для определения ОСО [Ионов и др., 2021]. Сопоставления рассчитанных величин ОСО с данными независимых измерений показали их систематическое расхождение, которое может быть устранено при более тщательной адаптации алгоритма DOAS к условиям задачи и характеристикам прибора УФОС. В [Виролайнен и др., 2021] представлена усовершенствованная методика обработки наземных спектральных измерений Фурье-спектрометра Bruker 125HR для получения информации об ОСО и других стратосферных газов и продемонстрировано использование наземных измерений для интерпретации процессов, происходящих в озоносфере.

ИФА РАН выполняло ежедневные измерения содержания NO_2 в вертикальном атмосферном

столбе, которое тесно связано с ОСО и которое необходимо для изучения изменений в состоянии озонового слоя, на КВНС, ЗНС и в Томске.

На Сибирской лидарной станции Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН в Томске (56.5 с.ш., 85.0 в.д.) продолжалось вертикальное зондирование для изучения динамики озона в районе тропопаузы и отслеживания глобальных изменений в озоносфере [Dolgii et al., 2019]. Зондирование проводится по дифференциальному поглощению на парах длин волн 299/341 и 308/353 нм с учетом температурной и аэрозольной поправок. Лидарная система охватывает диапазон высот ~5–45 км. Проведено тестирование и выбор наиболее оптимальных наборов сечений поглощения для восстановления вертикального распределения озона в верхних слоях тропосферы-стратосферы [Dolgii et al., 2022], разработана методика температурной коррекции, повышающая точность получения данных [Dolgii et al., 2020].

Продолжались измерения вертикального распределения озона микроволновым спектрометрическим над Нижним Новгородом [Рыскин и др., 2012; Куликов, 2022], которые охватывали диапазон высот 25–60 км.

Регулярно производятся сравнения результатов наземных измерений ОСО разной аппаратурой, что дает возможность оценить однородность рядов данных и достоверность получаемой информации. В работе [Неробелов и др., 2022] сопоставлены результаты наземных измерений ОСО Спектрофотометром Dobson, фильтровым озонометром М-124 и Фурье-спектрометром Bruker 125HR расположенными вблизи Санкт-Петербурга на расстоянии около 50 км друг от друга. Сопоставление результатов среднесуточных значений показало, что разброс данных между разными ансамблями измерений ОСО не превышает измерительных погрешностей методов. Временное изменение среднемесячных ОСО по данным трех наборов наземных измерений в районе Санкт-Петербурга не показало явного постепенного межгодового увеличения или уменьшения содержания газа за период 2009–2020 гг.

Информация о пространственно-временных изменениях ОСО, полученная с помощью различных методов и моделей наблюдений, может значительно отличаться из-за ошибок измерения и моделирования, различий в алгоритмах поиска озона и т.д. Поэтому данные, полученные различными способами, должны регулярно проверяться. Сравнения рядов данных ОСО, полученных наземными приборами (Bruker IFS 125 HR, Dobson и М-124), спутниковыми (ОМІ, TROPOMI и IKFS-2) приборами и моделями (реанализ ERA5 и EAC4, модели EMAC и INM RAS–RSHU) вблизи Санкт-Петербурга (Россия) в период с 2009 по 2020 г. демонстрируют хорошую согласо-

ванность (коэффициенты корреляции 0.95–0.99). Все наборы данных воспроизводят выраженный сезонный ход ОСО с максимумом весной и минимумом осенью. Для периода 2004–2021 гг. характерна значительная положительная тенденция ОСО вблизи Санкт-Петербурга ($\sim 0.4 \pm 0.1$ ед. в год) по всем массивам [Nerobelov et al., 2022].

Данные по ОСО периодически сравниваются в ИОА СО РАН и ИМКЭС СО РАН с другими приборами. В работах [Баженов и др., 2022; Bazhenov et al., 2022] сопоставлялись измерения ОСО приборами М-124, а также спутникового датчика Aura OMI. Сравнение показало, что они хорошо коррелируют между собой в плане выраженных вариаций, возникающих во временных ходах, но амплитуды этих выбросов отличаются. В целом можно отметить, что прибор ИОА СО РАН превышает значения двух других приборов, а наименьшими являются значения ОСО Aura OMI.

В работах [Dolgii et al., 2020б, 2020в] сравниваются лидарные и спутниковые данные MLS/Aura и IASI/MetOp об озоне в стратосфере. Показано, что средняя относительная разность между измерениями LiDAR и MLS/Aura отрицательна в диапазоне высот 16–38 км и достигает –49.81% на 38 км. Средняя относительная разность между измерениями LiDAR и IASI/MetOp положительна в диапазоне высот 6–18 км, где она достигает 43.68% на 16.80 км, и отрицательна выше, где достигает – 43.86% на 20 км.

В [Dolgii et al., 2020а] сопоставлены измерения профилей содержания озона в атмосфере Санкт-Петербурга с помощью наземного ФС Bruker 125HR и спутникового микроволнового прибора (MLS) за временной период 2018–2020 гг. и исследовали вертикальный ход рассогласования двух типов измерений профиля озона. Сравнение показало удовлетворительные результаты.

Одной из главных задач наземных измерений является обеспечение валидации спутниковой аппаратуры. Спутниковые методы дистанционного зондирования вносят значительный вклад в анализ пространственного распределения и временной эволюции содержания озона и его аномалий. Разработанная в СПбГУ методика позволяет определять ОСО по результатам измерений прибором IKFS-2 (инфракрасный фурье-спектрометр), расположенным на борту спутника Meteor-M N2 [Polyakov et al., 2021]. Сопоставление результатов спутниковых измерений с наземными наблюдениями в 2019–2020 гг. продемонстрировали согласованность глобальных полей распределения ОСО IKFS-2 с измерениями аппаратурой OMI, данными реанализа ECMWF ERA5 и результатами наземных измерений.

В работах [Chan et al., 2023; Трифонова-Яковлева и др., 2017] оцениваются возможности продуктов GOME-2. Установлено, что осредненные

значения наземных измерений и спутниковых оценок хорошо согласуются между собой для периода осреднения от тридцати дней. Также показано, что спутниковые оценки пригодны для описания регионального загрязнения, правдоподобно отражают как годовой ход, так и пространственное изменение концентрации, однако существуют ограничения на использование этих оценок для описания мгновенной концентрации, а также непосредственно городского загрязнения.

2.2. Исследование динамики стратосферного озона

В большом цикле статей представлены результаты многолетних измерений временной изменчивости общего содержания O_3 и NO_2 на Кисловодской высокогорной (КВНС) и Звенигородской (ЗНС) научных станциях ИФА им. А.М. Обухова РАН [Груздев и др., 2021, 2022а, 2022б; Gruzdev et al., 2021а, 2021б, 2022а, 2022б, 2022в; Savinykh et al., 2021а, 2021б]. Анализ многолетней изменчивости данных измерений выполнен с помощью метода множественной линейной регрессии. Получены годовые и сезонно-зависимые оценки линейных трендов O_3 и NO_2 . Общей особенностью долговременных тенденций ОС O_3 на КВНС и ОС NO_2 на ЗНС и КВНС являются значительные тренды в зимне-весенний сезон. Они на обеих станциях отрицательные, и на КВНС сильнее, чем на ЗНС. Тенденция ОСО положительная в 1989–2002 гг. (1.6% за десятилетие) и отрицательная в 2003–2020 гг. (–1.2% за десятилетие). Полученные характеристики изменчивости озона свидетельствуют об особом характере межгодовой и долгосрочной эволюции ОСО над Северным Кавказом. В частности, тенденции ОСО в Северо-Кавказском регионе противоположны тенденциям зональных средних значений ОСО. Были получены зависимые оценки линейных тенденций и межгодовых вариаций во всем озоне, связанном с эффектами 11-летнего солнечного цикла, квазидвухлетнего колебания (QBO) в экваториальной стратосфере, North Atlantic Oscillation (NAO) и El Nino-Southern Oscillation (ENSO). Изменения общего озона в течение 11-летнего солнечного цикла на Кавказе особенно существенны летом и составляют около 4%. Связанные с QBO межгодовые колебания общего озона с амплитудой около 6% проявляются в холодное время года. Общие колебания озона, обусловленные NAO, выражены в зимне-весенний период. Воздействие ENSO на общий озон заметно летом и примерно на год отстает от изменений температуры поверхности моря в регионе, так что общий озон уменьшается после событий El Nino и увеличивается после событий La Nino. Полученные характеристики общей изменчивости озона указывают на особый

характер многолетних и многолетних изменений общего озона на Северном Кавказе.

В цикле работ ИОА СО РАН проведено исследование распределения аэрозоля и озона лидарным методом с привлечением для интерпретации спутниковой информации [Баженов, 2021; Баженов и др., 2019, 2020, 2021; Vazhenov et al., 2021а, 2021б, 2022; Невзоров и др., 2021а, 2021б; Nevzorov et al., 2021, 2022]. Лидарные измерения на Сибирской лидарной станции показали наличие стратосферных аэрозольных слоев и дефицита ОСО над городом зимой 2017–2018 гг. Данные Aura OMI/MLS указывали на то, что в декабре 2017–январе 2018 г. общее содержание озона и содержание NO_2 в стратосфере над севером Евразии, а также температура в стратосфере были значительно ниже нормы. Анализ обратных траекторий и интегрального (по профилю) ОСО выявил, что динамическое возмущение арктической стратосферы в декабре 2017 г. привело к вытеснению холодных воздушных масс с избыточным содержанием агрессивного хлора (ввиду дефицита NO_2) за пределы полярного круга и их вторжению в стратосферу Томска.

В работе [Vazhenov, 2019] исследовано влияние повышенной влажности в стратосфере Арктики на уровень разрушения озона. Анализ данных Aura MLS показал, что температура в стратосфере Арктики была намного ниже нормы в течение всего периода январь–март 2011 г. в интервале высот 20–35 км. Это привело к значительному распространению полярных стратосферных облаков (ПСО), которые формировались наиболее интенсивно на высотах и в периоды минимальных температур (максимального падения температур ниже порога образования ПСО). Основные потери озона наблюдались в марте. Этому способствовало фотохимическое высвобождение хлора, избежавшего деактивации ввиду дефицита азота, вызванного денитрификацией в ходе частых явлений дегидратации, о чем могут свидетельствовать колебания высоты максимального отклонения влажности от многолетней нормы. Повышенная влажность в стратосфере увеличила пороговую температуру образования ПСО, наблюдавшихся до конца марта; в результате был повышен порог активации хлора и, таким образом, отсрочена его деактивация. Это еще более увеличило уровень суммарных потерь озона в марте 2011 г.

В работе [Belikovich et al., 2021] представлены результаты наземных микроволновых измерений эволюции вертикального распределения озона в средней атмосфере над Нижним Новгородом ($56^{\circ}20'$ с.ш., 44° в.д.) зимой 2017–2018 гг. Выполнено их сопоставление с данными спутникового зондирования, полученными с помощью прибора MLS на спутнике Aura, и с данными реанализа

ERA5. В частности, установлена степень зависимости распределения озона в стратосфере от положения границы полярного вихря на разных высотах по отношению к пункту наблюдения. Зарегистрировано, что в январе 2018 г. вихрь приблизился к Нижнему Новгороду и далее вплоть до своего разрушения (12 февраля) его граница осциллировала над городом, так что внутри или снаружи вихря попеременно оказывались разные высотные эшелоны. Такая динамика вихря наиболее заметно повлияла на эволюцию стратосферного максимума содержания озона, положение которого отслеживало изменение границы вихря и квазипериодически менялось в диапазоне высот 30–35 км. Результаты наземного микроволнового зондирования в среднем дают меньшее относительное содержание озона, чем данные MLS с максимальным систематическим различием ~ 0.8 млн⁻¹ на высоте 38–39 км. Тем не менее, анализ наземных измерений позволил зарегистрировать более четкую реакцию озона на изменение структуры вихря над Нижним Новгородом, чем анализ спутниковых данных и данных реанализа.

Сотрудниками ИПФ РАН впервые в атмосфере Земли экспериментально зарегистрирован нелинейный фотохимический отклик на суточные вариации солнечной освещенности на второй субгармонике этого воздействия [Kulikov et al., 2021]. В результате теоретического исследования двухсуточных фотохимических осцилляций компонент семейств нечетного кислорода O_x (O , $O(1D)$, O_3) и водорода HO_x (H , OH , HO_2) на высотах мезопаузы (80–90 км) с помощью моделей различной сложности были определены индикаторы присутствия этого феномена в данных ракетного и спутникового зондирования. Наиболее выраженной особенностью этих осцилляций является значительная (на несколько порядков величины) разница между двумя последовательными значениями концентрации H в конце ночи. Кроме того, установлено, что необходимыми условиями проявления этих осцилляций в профиле H перед восходом Солнца являются определенные ограничения на времена жизни семейства HO_x и O в соответствующие моменты локального времени. Обработка данных спутниковой кампании SABER/TIMED позволила получить первые экспериментальные свидетельства существования двухсуточных фотохимических осцилляций на высотах мезопаузы.

В атмосфере по-прежнему наблюдается дефицит озона над полярными районами [Киселев, 2020]. Это делает актуальным исследование “озоновых дыр”, чему посвящен целый ряд работ.

В работах [Варгин и др., 2020; Фролькис и др., 2021], выполненных для Антарктики показано, что гипотеза о возможном наличии связи между квазидвухлетним колебанием и состоянием антарктической “озоновой дыры” с большой долей

вероятности не имеет под собой оснований. По данным спутникового мониторинга озонового слоя TOMS/OMI, реанализа MERRA-2 и баллонного зондирования вертикального распределения озона и температуры на Южном полюсе проведено исследование изменчивости параметров антарктической озоновой аномалии. Анализируются динамические процессы в стратосфере Антарктики, определяющие условия для сильного разрушения озонового слоя, которое за последние 8 лет, несмотря на уменьшение концентраций озоноразрушающих веществ, наблюдалось в Антарктике в 2011 и 2015 гг.

Озоновая аномалия в Арктике анализировалась в [Никифорова и др., 2019] и были установлены ее характерные особенности.

Продолжаются совместные исследования озона в Арктическом регионе с коллегами из Европейских институтов. Анализ наземных наблюдений на 38 европейских станциях позволил оценить реакцию озонового слоя над Европой на экстремальное истощение озонового слоя в Арктике в 2020 г. [Petkov et al., 2023] Влияние распространялось до средних широт Европы, но с уменьшением амплитуды и задержкой по времени до 20 дней. Развитие ситуации было аналогично тому, что наблюдалось после значительного разрушения озонового слоя в Арктике в 2011 г.

Зимой–весной 2019–2020 гг. наблюдалась самая значительная озоновая аномалия в Арктике за всю историю наблюдений [Баженов, 2021; Цветков и др., 2021]. Она была обусловлена необычайно сильным и продолжительным полярным вихрем, повлекшим беспрецедентное химическое разрушение озона. Анализ данных Aura OMI/MLS показал, что общее содержание озона неуклонно сокращалось и составило 230 е.Д. 18 марта в пункте Алерт, 222 е.Д. 18 марта в Эврике, 229 е.Д. 20 марта в Туле и 226 е.Д. 18 марта в Резольют. Минимальная температура была на 9–10% ниже нормы с декабря по апрель в стратосфере над Томском и Арктикой. Концентрация озона уменьшалась до 4 и 6% от многолетней средней на высоте 20 км 27 марта в пункте Эврика и на высоте 19 км 16 апреля в пункте Нью-Олесунн, соответственно. Такое явление вписывается в контекст климатических изменений, ведущих к охлаждению стратосферы.

В работе [Ситнов и др., 2021] появление озоновой дыры связывается с процессом блокирования. Аномалия ОСО была обусловлена главным образом уменьшением содержания озона в нижней стратосфере, достигавшим 50% вблизи уровня 70 гПа. При ключевом вкладе атмосферных динамических процессов в формирование озоновой “мини-дыры” отмечена возможность вклада разрушения озона в гетерогенных реакциях на поверхности полярных стратосферных облаков

вследствие сильного понижения температуры в стратосфере над областью блокирования.

К интересным явлениям, которые наблюдаются в средней атмосфере, относятся и стратосферные потепления. Одно из таких описано в [Варгин и др., 2019]. Оно зафиксировано над Канадой в конце декабря 2017 г. и в начале января 2018 г. Главное же внезапное стратосферное потепление в феврале 2018 г. сопровождалось изменением направления зонального ветра, разделением стратосферного полярного вихря, распространением аномалий циркуляции стратосферы до нижней тропосферы, похолоданием в мезосфере, изменением высоты стратосферы и снижением температуры нижней стратосферы в тропиках.

2.3. Моделирование процессов в озоносфере

В [Кривоуцкий и др., 2021] представлен обзор работ, выполненных в лаборатории химии и динамики атмосферы Центральной аэрологической обсерватории, по созданию и использованию глобальных численных моделей атмосферы. Среди них несколько относятся к теме данного обзора.

В [Иванова, 2021] для изучения изменчивости и взаимосвязи содержания полярного озона на основе данных о полярной температуре на уровнях 30, 70, 100 гПа и о среднем зональном ветре в полосе широт 45–75° на уровнях 10, 70 гПа построена модель полярного озона в Арктике и Антарктике для зимне-весеннего периода. Модель протестирована по данным измерений в 1979–2020 гг. и выполнена оценка погрешностей расчета полярного озона.

В работах [Smyshlyaev et al., 2021; Лукьянов и др., 2021] анализируются динамические процессы и изменения озонового слоя в арктической стратосфере зимой 2019–2020 годов. Анализ выполнен с помощью численных экспериментов с химико-транспортной моделью (ХТМ) и данных повторного анализа. Динамические условия зимы-весны 2019–2020 годов описывали снижение озона до 100 единиц Добсона (ДЕ) в Восточном полушарии и свыше 150 единиц ДУ в Западном полушарии. При этом, фотохимическое разрушение озона, как в западном, так и в восточном полушариях на максимуме составляло около 50 ДЕ с пиками в апреле в восточном и в марте - апреле в западном полушариях. Гетерогенная активация галогенных газов на поверхности полярных стратосферных облаков, с одной стороны, привела к резкому увеличению разрушения озона в каталитических циклах хлора и брома. С другой стороны, уменьшила его разрушение в азотных каталитических циклах. Анализ активности волн с использованием потоков 3D Plumb показал, что усиление распространения активности восходящих волн в середине марта над Аляскинским заливом наблюдалось на стадии развития незначительного вне-

запного стратосферного потепления событие, которое привело к смещению стратосферного полярного вихря на север Канады и уменьшению объема полярных стратосферных облаков. Вследствие низкой активности планетарных волн, полярный вихрь в 2019–2020 гг. оставался устойчивым вплоть до конца апреля, что создало условия для рекордного разрушения озона в Арктике.

Работы [Варгин и др., 2020; Кривоуцкий и др., 2020; Tsvetkova et al., 2020] посвящены вопросам тестирования и усовершенствования моделей. С использованием данных пяти 50-ти летних расчетов по пятой версии климатической модели ИВМ РАН для современных условий анализируется межгодовая изменчивость характеристик стратосферного полярного вихря в Арктике и дат весенней перестройки циркуляции стратосферы по сравнению с данными реанализа. Ранние перестройки сопровождаются более сильной волновой активностью по сравнению с поздними. Зимние сезоны с максимальным объемом воздуха в полярной стратосфере и условиями, достаточными для формирования полярных стратосферных облаков, в среднем характеризуются ранними весенними перестройками. Выполнены численные сезонные прогнозы температуры по двум интерактивно работающим численным глобальным моделям: фотохимической модели ЦАО CHARM (0–90 км) и модели сезонного прогноза ГМЦ/ИВМ РАН ПЛАВ (0–30 км). Проведено сравнение результатов прогноза с данными реанализа. Установлено, что новая объединенная модель FOROZ (Forecastwith Ozone) показала устойчивость при реализации численных сценариев. Сезонные прогностические поля температуры модели ПЛАВ и объединенной модели FOROZ с данными реанализа близки в нижней тропосфере и отличаются в стратосфере. Объединенная модель FOROZ улучшает прогноз температуры в верхней тропосфере и стратосфере.

Для изучения изменений арктического полярного стратосферного вихря в ближайшем будущем в [Vargin et al., 2022] проведено моделирование по 5 версии климатической модели ИВМ РАН для периода 2015–2100 гг по двум сценариям SSP2-4.5 и SSP5-8.5 роста концентрации парниковых газов. Выявлено усиление распространения волновой активности и стационарной планетарной волны номер 1 в средней и верхней стратосфере, ускорение меридиональной циркуляции, увеличение зимнего среднего полярного стратосферного объема (V_{psc}) и усиление межгодовой изменчивости арктической стратосферы после середины XXI века, особенно по сценарию SSP5-8.5. Мартовские месячные значения V_{psc} в некоторые зимы могут быть примерно в два раза больше, чем наблюдаемые в арктической стратосфере весной 2011 и 2020 гг, что в свою очередь может привести к большому разрушению озонового

слоя. Комплексный анализ показывает, что “теплые” зимы с наименьшими средними значениями V_{psc} характеризуются усилением распространения волновой активности из тропосферы в стратосферу в декабре, но более слабым распространением в январе–феврале по сравнению с зимами, имеющими наибольшие значения V_{psc} .

Моделирование поведения озонового слоя в прошлом и будущем активно осуществляется в Санкт-Петербургском государственном университете. Основой для исследований являются как ранее разработанные модели химии и климата семейства SOCOL [Muthers et al., 2014] и HAMMONIA [Schmidt et al., 2006], так и новая модель земной системы SOCOL4 [Sukhodolov et al., 2021], включающая в себя интерактивный океан, динамическую растительность, атмосферную химию и микрофизику сульфатного аэрозоля. Для дальнейшего совершенствования моделей было исследовано возможное влияние йодсодержащих примесей на озоновый слой [Karagodin-Doyennel et al., 2021]. Было показано, что разрушение озона йодсодержащими примесями естественного происхождения оказывает некоторое влияние на климатологию озонового слоя более заметное в тропосфере. В то же время, удвоение современных эмиссий йодсодержащих примесей, ожидаемое в будущем, оказывает слабое влияние на озоновый слой в нижней стратосфере и уменьшает общее содержание озона в столбе атмосферы на 1.5–2.5%. Полученные результаты демонстрируют сравнительно низкую чувствительность атмосферного озона к химии йода для будущих периодов, но неопределенность остается высокой из-за нехватки данных наблюдений соединений йода. Таким образом, для расчетов эволюции озонового слоя с 1980 по 2100 гг была использована базовая версия модели SOCOL4 [Sukhodolov et al., 2021] без учета йодсодержащих примесей. Расчеты изменений озонового слоя в исторический период проводились с использованием наблюдаемых параметров для всех факторов воздействия таких как: концентрации парниковых и озон разрушающих примесей, эмиссии газов источников, солнечной радиации, вулканических извержений. Рассчитанные тренды сравнивались с результатами анализа изменений озона, полученных из данных мультисенсорных композитов BASIC и MSRV2, и данных реанализа MERRA-2 и ERA-5. Анализ тенденций выполнялся отдельно для периода истощения (1985–1997 гг.) и восстановления озонового слоя (1998–2018 гг.). В период 1998–2018 гг. SOCOLv4 показывает статистически значимые положительные тренды содержания озона в мезосфере, верхней и средней стратосфере и устойчивое увеличение тропосферного озона. Результаты SOCOLv4 [Karagodin–Doyennel, 2022a] также указывают на некоторые негативные тенденции в нижних слоях тропической и среднеширотной

стратосферы, которые, не согласуются с данными BASIC с позиции величины и статистической значимости. Несмотря на несколько меньшую значимость и масштабность результатов моделирования, в работе делается вывод о том, что современные ССМ, такие как SOCOLv4, в целом способны воспроизводить наблюдаемые изменения концентрации озона. Этот вывод обосновывает использование таких моделей для прогнозирования будущей эволюции озонового слоя.

Оценки изменений озонового слоя в будущем проводились по модели SOCOLv4 с использованием сценариев изменений концентрации парниковых и озоноразрушающих примесей, эмиссий газов источников, солнечной радиации, вулканических извержений [Karagodin-Doyennel, 2022b]. Моделирование было выполнено на основе двух потенциальных IPCC сценариев: SSP2-4.5 и SSP5-8.5. В обоих сценариях модель показывает снижение содержания тропосферного озона в будущем, которое начнется в 2030-х годах в SSP2-4.5 и после 2060-х годов в SSP5-8.5 и связано с уменьшением концентраций прекурсоров озона, таких как NO_x и CO. Результаты также указывают на весьма вероятное увеличение содержания озона в мезосфере, верхней и средней стратосфере, а также в нижней стратосфере в высоких широтах. В соответствии с SSP5-8.5 увеличение содержания озона в стратосфере выше из-за более сильного охлаждения (>1 К за десятилетие), вызванного парниковыми газами, которое замедляет циклы каталитического разрушения озона. Напротив, в тропической нижней стратосфере концентрации озона уменьшаются, но возрастают над средними и высокими широтами обоих полушарий за счет усиления меридионального транспорта, который сильнее для сценария SSP5-8.5. Признаков снижения уровня озона в SOCOLv4 предполагает, что эволюция стратосферного озона на протяжении 21 века будет в значительной степени определяться не только снижением в концентрации галогенов, но и за счет будущих выбросов парниковых газов. Поэтому, хотя проблема антропогенного выброса галогенов на сегодняшний день поставлена под контроль, будущие изменения озона в глобальном и региональном масштабе, все еще неясны и во многом зависят от развития будущей деятельности человека.

Полученные оптимистические в целом оценки изменения озонового слоя в будущем резко контрастируют с ситуацией, когда меры по защите озонового слоя не были бы приняты. Новые оценки, выполненные с помощью модели SOCOLv4 [Egorova et al., 2022], включающей интерактивный океан и динамическую растительность подтвердили драматическое разрушение озонового слоя в этом случае, рассчитанное ранее с менее сложными моделями. Также в этой работе было показано, что введение ограничений на производство озоноразрушающих примесей поз-

волило не допустить дополнительного потепления глобального климата более чем на 2 К.

Большое внимание было посвящено воздействию на озоновый слой факторов связанных с космической погодой. Использование химико-климатической модели HAMMONIA [Schmidt et al., 2006] позволило оценить влияние солнечных вспышек в сентябре 2017 года на химический состав атмосферы [Pikulina et al., 2022]. Показано, что солнечные вспышки в начале сентября 2017 г. привели к значительному увеличению концентраций активных оксидов азота и водорода в экваториальных и южных высоких широтах. Однако это увеличение не повлияло на изменение содержания озона в тропической стратосфере, поскольку процесс разрушения озона окислами (NO_x) азота не эффективен в верхней мезосфере и нет нисходящих потоков воздуха, которые могли бы переносить дополнительные NO_x в стратосферу. Окислы водорода (HO_x) не оказывают существенного влияния на озон в течение рассматриваемых сезонов, однако некоторое разрушение озона, коррелированное с увеличением HO_x , моделируется в южном полушарии. В работе делается вывод о слабом влиянии электромагнитного излучения на атмосферу Земли во время солнечных вспышек. Как показано в работах [Mironova et al., 2022] и [Grankin et al., 2023] значительно большее влияние на озон могут иметь высыпаящиеся из магнитосферы энергичные электроны.

Моделирование последствий экстремального события над Москвой в декабре 2009 г. с помощью модели HAMMONIA показало почти полное разрушение озонового слоя в мезосфере и нижней термосфере северного полушария. В работе [Grankin et al., 2023] рассматривались высыпания энергичных электронов над городом Апатиты и рассчитывалось вызванные этими событиями изменения концентраций озона, электронов, окислов азота и водорода. Для событий 9.10.1998 и 01.09.2000 рассчитанное падение концентрации озона составило 14 и 30% на высоте 75 км. Полученные результаты указывают на потенциально существенное влияние энергичных электронов на химию атмосферы.

Условие химического равновесия ночного озона широко используется для восстановления пространственно-временных распределений ночных O, N и некоторых других характеристик в диапазоне высот 80–100 км по спутниковым данным. В работе [Kulikov et al., 2019] с помощью ранее созданного аналитического критерия была найдена граница, ниже которой равновесие ночного озона существенно нарушается. Проведена обработка годовой (за 2004 г) базы данных SABER/TIMED одновременных ночных измерений профилей температуры, давления, концентрации озона и объемной скорости эмиссии OH^* вблизи 2 мкм в результате пере-

ходов (9–7) и (8–6) в диапазоне высот 75–100 км. Было обнаружено, во-первых, что положение границы равновесия ночного озона варьируется в диапазоне 77–86 км в зависимости от сезона и широты, что в целом подтверждает выводы теоретических работ [Belikovich et al., 2018; Kulikov et al., 2018]. Кроме того, было обнаружено, что эта граница является чувствительным индикатором эволюции средней атмосферы. В частности, результаты обработки данных SABER в 2003–2005 годах показали, что аномальные широтные зависимости положения границы равновесия озона выше 60°N в январе–марте 2004 связаны с очень необычной динамикой стратосферного полярного вихря в течение арктической зимы 2003–2004 гг., которая была “remarkable winter in the 50-year record of meteorological analyses” и сопровождалась явлением приподнятой (до 80 км) стратопазузы [Manney et al., 2006]. Во-вторых, проведено восстановление пространственно-временных распределений ночных концентраций O и N по данным SABER за 2004 г. Было обнаружено, что применение условия равновесия озона ниже границы его равновесия приводит к значительной (до 5–8 раз) недооценке концентрации O в диапазоне высот 80–86 км, но практически не сказывается на качестве восстановления N. В недавней работе [Kulikov et al., 2023a] указанный критерий был улучшен, в результате чего положение границы равновесия ночного озона, найденное с помощью критерия практически идеально соответствует результатам химико-транспортного моделирования. Кроме того, в данной работе представлена общая теория фотохимического/химического равновесия малых примесей атмосферы и строго математически выведен набор условий, обеспечивающих близость концентрации конкретной примеси к своему мгновенно-равновесному значению.

В работе [Kulikov et al., 2020a] новый источник $\text{O}(^1\text{D})$ в области мезопазузы за счет процесса $\text{OH}(v \geq 5) + \text{O}(^3\text{P}) \rightarrow \text{OH}(0 \leq v' \leq v-5) + \text{O}(^1\text{D})$ впервые применен для восстановления пространственно-временного распределения ночного $\text{O}(^1\text{D})$ по данным SABER/TIMED за 2003–2005 гг. С помощью условия ночного химического равновесия озона показано, что в течение года в зависимости от месяца среднемесячные распределения $\text{O}(^1\text{D})$ имеют от 2 до 4 максимумов со значениями до 340 см^{-3} , которые локализованы по высоте (~92–96 км) и широте (на ~20–40°S, N и ~60–80°S, N). Среднегодовые распределения в 2003–2005 гг. имеют один слабый максимум на ~93 км и ~65°S со значениями $150\text{--}160 \text{ см}^{-3}$ и 3 ярко выраженных максимума (со значениями до 230 см^{-3}) на ~95 км и ~35°S, на ~94 км и ~40°N, на ~93 км и ~65–75°N, соответственно. В целом, в северном полушарии несколько больше $\text{O}(^1\text{D})$, чем в южном. Полученные результаты представляют собой уникальную на данный момент базу данных для последующей

оценки влияния ночного $O(^1D)$ на химический состав области мезопаузы.

В работе [Kulikov et al., 20206] впервые проведено аналитическое исследование механизма генерации реакционно-диффузионных волн в области мезопаузы (80–90 км). Эти волны представляют собой нелинейные фазовые фронты осцилляций концентраций O , O_3 , H , OH и HO_2 с периодом 2 суток, двигающиеся в зональном направлении (строго на восток) с постоянной скоростью. Они появляются, когда фотохимия мезосферы субгармонично (с периодом 2 дня) откликается на суточные вариации солнечной радиации (внешнее периодическое воздействие) с учетом горизонтальной турбулентной диффузии. Фотохимическая система в области мезопаузы представляет собой нелинейный осциллятор, который описывается системой двух дифференциальных неавтономных уравнений со степенной нелинейностью, которая была выведена в более ранних работах авторов. Установлено, что реакционно-диффузионные волны обусловлены специфическим переносом «ветрового» типа, возникающим в уравнениях для амплитуд двухсуточных фотохимических колебаний концентраций O и H вследствие зональной неоднородности внешнего воздействия. Полученное выражение для скорости распространения волны полностью подтвердило ранее полученные численные результаты о том, что величина скорости пропорциональна коэффициенту диффузии и градиенту фазы внешнего воздействия. Направление распространения волны определяется специфическими фазовыми соотношениями и зависит только от внутренних параметров системы. Проведенное исследование имеет фундаментальное значение, например, с точки зрения предсказания возникновения подобных явлений в фотохимии атмосферы в других регионах вследствие как суточных вариаций солнечной радиации, так и присутствия множества других периодических воздействий. С практической точки зрения, данный результат позволяет определить основные индикаторы реакционно-диффузионных волн, необходимые для их последующего экспериментального обнаружения в реальных условиях мезопаузы и количественной оценки величины коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии – одного из важнейших, но не измеряемых параметров переноса на высотах данной области атмосферы.

В работе [Kulikov et al., 2022a] проведен анализ качества восстановления дневных распределений O , H , OH , HO_2 и скорости химического нагрева на высотах 77–100 км по многолетней (2003–2015) базе данных SABER/TIMED с помощью условия фотохимического равновесия дневного озона. Обнаружено, что общепринятое отбрасывание в этом условии реакции $O_3 + H \rightarrow O_2 + OH$ приво-

дит к недооценке (до 35–40%) концентрации O и скорости химического нагрева и значительной переоценке (до ~50–85%) концентраций HO_2 и OH . В последующей работе [Kulikov et al., 20226] улучшенная модель возбужденного OH с константами, соответствующими опубликованным данным, применена для восстановления дневных распределений O , H , OH , HO_2 по этим же данным SABER/TIMED. Обнаружено, что изменения параметров процедуры восстановления приводят к заметному (до 80%) возрастанию концентрации O ниже 85–86 км, к значительному (до 170%) возрастанию концентраций H , OH и HO_2 ниже 90 км и заметному (до 40%) их уменьшению вблизи 100 км.

В работе [Kulikov et al., 20236] с целью снижения неопределенности в определении резонансной частоты линии излучения озона вблизи 110.836 ГГц (вращательный переход $J = 61.5–60.6$), широко используемой для пассивного измерения вертикальных профилей концентрации озона на высотах стратосферы и нижней мезосферы, проведен анализ результатов длительных наземных измерений спектров атмосферного микроволнового излучения в данном спектральном диапазоне. Использование созданной в ИПФ РАН модернизированной аппаратуры с высоким спектральным разрешением (~12 кГц) позволило с недоступной ранее точностью определить резонансную частоту данной линии излучения озона, которая оказалась равной 110835.909 ± 0.016 МГц. Было показано, что доплеровский сдвиг частоты горизонтальным ветром, а также вариации тропосферного поглощения не влияют на полученный результат. Найденное значение на 130 кГц меньше лабораторно измеренного и отличается от результатов расчетов с помощью современных спектроскопических моделей, но близко к результатам первых полуэмпирических расчетов, проведенных более 40 лет назад.

3. МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ

Применяемые методы для исследования озона в различной степени выше уже освещались в тексте. Остались не затронутыми в основном методы, которые разработаны для обработки данных.

На основе траекторной модели NOAA-NY-SPLIT_4 и реанализа NCEP/NCAR в Институте физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН разработан метод расчета сверхбольших наборов (миллионов траекторий) прямых и обратных траекторий [Shukurov et al., 2019]. С помощью массивов и траекторных методов выявляются поля потенциальных источников аэрозольных и газовых частиц. Проанализированы распределения потенциальных районов источников аммиачной селитры, сульфата аммония и силиката, вносящих вклад в приземный аэрозоль, а также тропосферного формальдегида и стратосферного диоксида

азота на Звенигородской научной станции, стратосферного озона на Кисловодской высокогорной научной станции, аэрозольного содержания столба на станциях АЭРОНЕТ в Томске и Уссурийске. Метод также применяется для выявления труднодоступных регионов, связанных с аномалиями зимней приземной температуры воздуха в Москве и аномалиями осадков в бассейне оз. Байкал.

В [Груздев, 2019; Gruzdev, 2019] предложен метод учета сериальной корреляции (автокорреляции) данных в задаче множественной линейной регрессии. Метод эффективен при анализе долгосрочных трендов и временных вариаций атмосферных примесей. Он позволяет учитывать автокорреляцию данных на больших масштабах. Остаточный ряд представляется в виде процесса авторегрессии, порядок которой k может быть намного больше единицы, и автокорреляционная функция процесса рассчитывается путем решения системы уравнений Юла–Уокера. По автокорреляционной функции конструируется автокорреляционная матрица, которая входит в формулы для оценок регрессионных коэффициентов и их стандартных ошибок. Эффективность метода демонстрируется на основе множественного регрессионного анализа данных 26-летних измерений общего содержания NO_2 на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы. Оценки регрессионных коэффициентов и их ошибки зависят от порядка авторегрессии k . Сначала ошибка увеличивается с увеличением k . Затем она достигает максимума и после этого начинает уменьшаться. В случае NO_2 ошибка в максимуме возрастает более чем вдвое по сравнению с ее начальным значением. Уменьшение ошибки после достижения максимума прекращается, если k достигает значения, при котором авторегрессионный процесс позволяет описать важные особенности автокорреляционной функции остаточного ряда. Получены оценки сезонно зависимых трендов и эффектов воздействия на NO_2 природных факторов, таких как 11-летний солнечный цикл, квазидвухлетняя цикличность, Североатлантическое колебание и других.

В статье [Stepanov, 2022] описывается новый подход к обработке длинных рядов данных мониторинга озона в приземной атмосфере, который получил название Data Parallel Processing in Block Streams. Предлагаемая методика основана на разбиении последовательного ряда начальных данных на блоки, заполняемые результатами мониторинга приземного озона в течение одних суток. Далее из таких блоков формируется цепочка, длина которой определяется общей протяженностью процесса наблюдений. Вдоль этой цепочки блоков проводится параллельная обработка начальных данных, направленная на сглаживание быстрых флуктуаций. Сглаженные данные затем используются для определения дневной наработ-

ки озона за счет фотохимических реакций, его минимальных ночных уровней, а также величины ночных максимумов. Возможности предлагаемого подхода демонстрируются на примере анализа данных мониторинга приземного озона в Москве в 2020 г.

В ИФА РАН продолжалось развитие и совершенствование наземного метода многоугловой дифференциальной спектроскопии (ДОАС) определения содержания NO_2 , H_2CO и других химически активных газов в пограничном слое атмосферы. В 2016 г. группа ИФА РАН приняла участие в международных сравнениях приборов и методик измерения NO_2 и других газов методом ДОАС – CINDI-2. На сравнениях CINDI-2 были представлены 36 спектральных приборов от 26 различных научных групп. В статьях [Kreher et al., 2020; Wang et al., 2020] приведены результаты сравнений методик восстановления таких химически активных веществ, влияющих на химию озона, как NO_2 , O_4 , O_3 , H_2CO , HNO_2 . По результатам сравнений сформулированы рекомендации по режимам измерений и параметрам обработки измерений метода ДОАС.

В ИОА СО РАН разработан новый лидар для измерения тропосферного озона и аэрозоля [Nevzorov et al., 2022]. Лидарная система создана на базе лазера QX 500 (“СОЛАР ЛС”, Беларусь) и телескопа Кассегрена с диаметром приемного зеркала 0,35 м и фокусным расстоянием 0,7 м. Она работает на длинах волн 299/341 нм и должна перекрывать диапазон высот от ~0,1 до 12 км. Там же существенно расширена возможность мониторинга УФ солнечной радиации в обсерватории “Фоновая” [Белан и др., 2022] и разработан новый детектор УФ излучения [Тентюков и др., 2021].

В АО “ОПТЭК” (Санкт-Петербург, Россия) создан газоанализатор синглетного кислорода [Iasenko et al., 2019]. Принцип прибора основан на хемилюминесцентной реакции 9,10-дефилантрацена. Новый газоанализатор предназначен для решения широкого спектра фундаментальных и прикладных задач, связанных с процессами и явлениями на границе между биогенной и абиогенной природой. Его возможности, продемонстрированные на примерах мониторинга концентраций загрязнителей в атмосферном воздухе, на экспериментах *in vivo* и *in vitro* по регистрации синглетного кислорода на поверхности снега и вблизи растений, зараженных патогенным грибом, а также на испытаниях фотокаталитических материалов, разработанных для использования в медицине и в охране архитектурных и скульптурных памятников от биодетериорации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2019–2022 гг. на территории России продолжались исследования атмосферного озона, как в

рамках Государственных системам мониторинга, так и инициативными группами в вузовских и научных организациях. Заметно расширилась сеть станций, проводящих измерения приземной концентрации озона. Начат выпуск обзоров о ПКО в Российской Федерации.

Совершенствовались методики обработки данных, разрабатывались новые приборы. Выполнен большой объем исследований по пространственно-временной изменчивости концентрации озона и факторах ее определяющих

С помощью численного моделирования сделаны оценки компонентов озоновых циклов, а также тенденций изменения озона до 2100 г.

Следует также отметить выход монографии посвященной истории исследования озона, охватывающей период от открытия кислорода до настоящего времени [Ларин, 2022].

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственных заданий РУДН, ИОА СО РАН, ЦАО, ИФА РАН, ИФМ СО РАН, ИОФ РАН, ГМЦ, ИПФ РАН, ЛИН СО РАН, СПбГУ, ГГО, при поддержке проектов Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение 075-15-2021-583), Российского научного фонда (проект № 20-17-00200и 21-17-210).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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., Сенник 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 атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 9. С. 710–721.
- 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., Сенник 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 атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 4. С. 292–301.
- Андреев В.В., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Демин В.И., Дудорова Н.В., Еланский Н.Ф., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Коновальцева Л.В., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Оболкин В.А., Постыляков О.В., Потемкин В.Л., Савкин Д.Е., Сенник И.А., Степанов Е.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В., Ходжер Т.В., Челибанов И.В., Челибанов В.П., Широков В.В., Шукуров К.А. Концентрация тропосферного озона на территории России в 2021 г. // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 7. С. 559–571.
- Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Антонович В.В., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Взаимосвязь динамики газового состава и метеорологических величин в районе Томска. // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 7. С. 529–537.
- Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н. Многолетняя изменчивость озона и аэрозоля в районе Томска и оправдываемость прогноза их среднегодовых концентраций на десятилетие. // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 9. С. 772–776.
- Аршинова В.Г., Белан Б.Д., Лапченко В.А., Лапченко Е.В., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Изменение приземной концентрации озона в осадках // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т.32. № 8. С. 657–664.
- Баженов О.Е. Озоновая аномалия зимой-весной 2019–2020 гг. в Арктике и над севером Евразии по данным спутниковых (Aura MLS/OMI) наблюдений. // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 7. С. 524–529.
- Баженов О.Е., Невзоров А.В., Долгий С.И., Ельников А.В., Сысоев С.М. Анализ годовых вариаций общего содержания озона и интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния в стратосфере над Томском // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Тезисы докладов XXV Международного симпозиума. Томск: Изд-во ИОА СО РАН. 2019. С.145.
- Баженов О.Е., Невзоров А.А., Невзоров А.В., Долгий С.И., Макеев А.П. Возмущение стратосферы над Томском зимой 2017/2018 гг. по данным лидарных и спутниковых (Aura MLS/OMI) наблюдений // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 7. С. 509–515.
- Баженов О.Е., Невзоров А.А., Невзоров А.В., Долгий С.И., Макеев А.П. Возмущение стратосферы над Томском зимой 2017–2018 гг. по данным лидарных и спутниковых (Aura MLS) наблюдений // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Тезисы докладов XXVII Международного симпозиума. Томск: Изд-во ИОА СО РАН. 2021. С.54.
- Баженов О.Е., Невзоров А.В., Смирнов С.В., Ельников А.В., Логинов В.А. Сравнение результатов наблюдений общего содержания озона над Томском (2006–2020 гг.), полученных тремя спектрофотометрами // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы [Электронный ресурс]: Материалы XXVIII Международного симпозиума, г. Томск, 4–8 июля 2022 г. — Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2022.
- Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Скляднева Т.К., Фофанов А.В. Радиационный блок измерительного комплекса обсерватории “Фоновая”. Часть I. Методические аспекты и технические характеристики. // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 9. С. 759–765.
- Белан Б.Д., Савкин Д.Е. Роль влажности в изменении приземной концентрации озона // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 5. С. 395–398.

- Бордовская Ю.И., Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М.* Сравнение наземного и спутникового методов определения вертикальных профилей содержания озона // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. № 2. С. 225–231.
- Борисов Д.В., Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А.* Исследование сезонной и суточной изменчивости концентраций приземного озона // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2020. № 3 (377). С. 122–135.
- Бручковский И.И., Боровский А.Н., Джола А.В., Еланский Н.Ф., Постыляков О.В., Баженов О.Е., Романовский О.А., Садовников С.А., Капауа У.* Наблюдения интегрального содержания формальдегида в нижней тропосфере в городских агломерациях Москвы и Томска методом дифференциальной спектроскопии // *Оптика атмосферы и океана*. 2019. Т. 32. № 1. С. 11–19.
- Варгин П.Н., Киришов Б.М.* Внезапное стратосферное потепление в Арктике в феврале 2018 г. и его влияние на тропосферу, мезосферу и озоновый слой // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 2. С. 41–56.
- Варгин П.Н., Кострыкин С.В., Ракушина Е.В., Володин Е.М., Погорельцев А.И.* Исследование изменчивости дат весенних перестроек циркуляции стратосферы и объема полярных стратосферных облаков в Арктике по данным моделирования и реанализа. // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2020. Т. 56. № 5. С. 1–13.
- Варгин П.Н., Никифорова М.П., Звягинцев А.М.* Изменчивость антарктической озоновой аномалии в 2011–2018 гг. // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 2. С. 20–34.
- Виролайнен Я.А., Поляков А.В., Тимофеев Ю. М.* Анализ изменчивости стратосферных газов по данным наземных спектроскопических наблюдений в районе Санкт-Петербурга // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2021. Т. 57. № 2. С. 163–174.
- Груздев А.Н.* Учет автокорреляции в задаче линейной регрессии на примере анализа общего содержания NO_2 в атмосфере // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55. № 1. С. 73–82.
- Груздев А.Н., Еланский Н.Ф., Арабов А.Я., Елохов А.С., Савиных В.В., Сенник И.А., Боровский А.Н.* Проявление 11-летнего солнечного цикла в общем содержании O_3 и NO_2 по результатам многолетних измерений на научных станциях Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН // Семнадцатая ежегодная конференция “Физика плазмы в солнечной системе”, 7–11 февраля 2022а г., г. Москва. Тезисы докл. Институт космических исследований РАН, Москва. С. 207.
- Груздев А.Н., Арабов А.Я., Елохов А.С., Савиных В.В., Сенник И.А., Боровский А.Н., Еланский Н.Ф.* Многолетние наблюдения стратосферных примесей в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН: Анализ трендов и межгодовых вариаций общего содержания O_3 и NO_2 // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2022б. Т. 58. № 3. С. 318–332.
- Груздев А.Н., Елохов А.С.* Изменения общего содержания и вертикального распределения NO_2 по результатам 30-летних измерений на Звенигородской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2021. Т. 57. № 1. С. 99–112.
- Давыдова М.А., Еланский Н.Ф., Захарова С.А., Постыляков О.В.* Применение численно-асимптотического подхода в задаче восстановления параметров локального стационарного источника антропогенного загрязнения // *Доклады РАН, сер. Математика*, 2021. Т. 496. С. 34–39.
- 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 // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2022. Т. 58. № 1. С. 92–108.
- Еланский Н.Ф.* Российские исследования атмосферного озона и его предшественников в 2015–2018 гг. // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2020. т. 56. № 2. С. 170–185.
- Иванова Н.С.* Статистическая модель полярного озона в зимне-весенний период // *Метеорология и гидрология*. 2021. № 5. С. 16–24.
- Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Кузнецова И.Н.* Содержание озона над территорией Российской Федерации во втором квартале 2020 г. // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 8. с. 138–143.
- Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Кузнецова И.Н.* Содержание озона над территорией Российской Федерации в третьем квартале 2020 г. // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 11. С. 140–144.
- Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Статников В.А.* Содержание озона над территорией Российской Федерации в 2018 г. // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 2. С. 136–142.
- Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Широков В.В.* Содержание озона над территорией Российской Федерации в первом квартале 2019 г. // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 6. С. 136–141.
- Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Широков В.В.* Содержание озона над территорией Российской Федерации во втором квартале 2019 г. // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 9. С. 137–140.
- Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Демин В.И.* Содержание озона над территорией Российской Федерации в первом квартале 2020 г. // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 6. С. 135–143.
- Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Широков В.В.* Содержание озона над территорией Российской Федерации в третьем квартале 2019 г. // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 12. С. 130–134.
- Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Лапченко В.А., Демин В.И.* Содержание озона над территорией Российской Федерации в 2019 г. // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 3. С. 127–134.
- Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Лезина Е.А.* Содержание озона над территорией Российской Федерации в I

- квартале 2021 г. // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 136–142.
- Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Лезина Е.А.* Содержание озона над территорией Российской Федерации во 2 квартале 2021 г. // Метеорология и гидрология. 2021. № 8. С. 135–141.
- Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Лезина Е.А.* Содержание озона над территорией Российской Федерации в 2021 г. // Метеорология и гидрология. 2022. № 3. С. 134–142.
- Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Лезина Е.А.* Содержание озона над территорией Российской Федерации в 1 квартале 2022 г. // Метеорология и гидрология. 2022. № 6. С. 137–143.
- Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Лезина Е.А.* Содержание озона над территорией Российской Федерации во 2 квартале 2022 г. // Метеорология и гидрология. 2022. № 8. С. 138–142.
- Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Лезина Е.А.* Содержание озона над территорией Российской Федерации во 3 квартале 2022 г. // Метеорология и гидрология. 2022. № 11. С. 138–142.
- Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А.* Содержание озона над территорией Российской Федерации в 2020 г. // Метеорология и гидрология. 2021 № 2. С. 131–140.
- Иванова Н.С., Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А.* Содержание озона над территорией Российской Федерации в третьем квартале 2021 г. // Метеорология и гидрология. 2021. № 1. С. 136–142.
- Ивашкин В.Т., Котельников С.Н., Степанов Е.В.* Возможное усиление тяжести протекания COVID-19 за счет сочетанного действия вируса Sars-CoV-19 и озона при сезонном повышении содержания озона в приземной атмосфере // Экология и Мир. 2020. № 4.
- Ионов Д.В., Привалов В.И.* Методика дифференциальной спектроскопии DOAS в задаче определения общего содержания озона из измерений наземного ультрафиолетового спектрометра УФОС // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 11. С. 842–848.
- Киселёв А.А.* Дефицит озона напоминает о себе // Российские полярные исследования. 2020. № 2 (40). С. 52–54.
- Котельников С.Н., Степанов Е.В.* Аномальная динамика содержания озона в тропосфере весной 2020 г. в средней полосе России // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2021. Т. 48. № 3. С. 44–51.
- Котельников С.Н., Степанов Е.В.* Роль водного аэрозоля в разложении озона в приземной атмосфере // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2019. Т. 46. № 9. С. 23–30.
- Котельников С.Н., Степанов Е.В., Ивашкин В.Т.* Приземные концентрации озона и здоровье различных возрастных групп населения в г. Москва летом 2010 г. // Геофизические процессы и биосфера. 2019. Т. 18. № 4. С. 26–38.
- Кривоулицкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Банин М.В., Толстых М.А.* Опытные глобальные прогнозы параметров атмосферы на основе экспериментальной технологии, учитывающей фотохимию озона (модель Foroz) // Геомагнетизм и аэрономия. 2020. № 2. С. 250–260.
- Кривоулицкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Черепанова Л.А., Банин М.В., Репнев А.И., Куколева А.А.* Численные глобальные модели ионосферы, озоносферы, температурного режима и циркуляции для высот 0–130 км. Результаты и перспективы // Метеорология и гидрология. 2021. № 9. С. 56–69.
- Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Кирсанов А.А., Борисов Д.В., Ткачева Ю.В., Ривин Г.С., Лезина Е.А.* Тестирование и перспективы технологии прогнозирования загрязнения воздуха с применением химических транспортных моделей CHIMERE и COSMO-Ru2ART. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 4 (386). С. 147–170.
- Куликов Ю.Ю., Кириллов А.С., Поберовский А.В., Имхасин Х.Х.* Микроволновый мониторинг содержания озона в средней атмосфере в Апатитах и Петергофе зимой 2021/22 г. // Метеорология и гидрология. 2022. № 12. С. 99–107.
- Лапченко В.А., Кузнецова И.Н.* Мониторинг приземного озона в природном заповеднике “Карадагский” в период 2017–2021 гг. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 2 (384). С. 113–125.
- Ларин И.К.* История озона. М.: РАН, 2022. 478 С.
- Локощенко М.А., Богданович А.Ю., Еланский Н.Ф., Лезина Е.А.* Температурные инверсии в Москве и их влияние на состав приземного воздуха // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 6. С. 641–650.
- Лукьянов А.Н., Варгин П.Н., Юшков В.А.* Исследование с помощью лагранжевых методов аномально устойчивого арктического стратосферного вихря, наблюдавшегося зимой 2019–2020 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 3. С. 278–285.
- Матвиенко Г.Г., Бабушкин П.А., Бобровников С.М., Боровой А.Г., Бочковский Д.А., Галилейский В.П., Гришин А.И., Долгий С.И., Елизаров А.И., Кокарев Д.В., Коношонкин А.В., Крючков А.В., Кустова Н.В., Невзоров А.В., Маричев В.Н., Морозов А.М., Ошлаков В.К., Романовский О.А., Суханов А.А., Трифонов Д.А., Яковлев С.В., Садовников С.А., Невзоров А.А., Харченко О.В.* Лазерное и оптическое зондирование атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 9. С. 726–740.
- Моисеенко К.Б., Васильева А.В., Скороход А.И., Штабкин Ю.А., Беликов И.Б., Репин А.Ю.* Фотостационарное равновесие в системе O_3-NO_x и генерация озона по данным измерений на фоновой высотной мачте ЗОТТО // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 10. С. 850–857.
- Моисеенко К.Б., Березина Е.В., Васильева А.В., Штабкин Ю.А., Скороход А.И., Еланский Н.Ф., Беликов И.Б.* NO_x -лимитирующий режим фотохимической генерации озона в слабо загрязненном конвективном пограничном слое: наблюдения на высотной мачте ЗОТТО в центральной Сибири в 2007–2015 гг. // Доклады РАН. 2019. Т. 487. № 6. С. 669–673.
- Нахаев М.И., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Борисов Д.В., Кирсанов А.А.* Прогнозирование концентраций загрязняющих веществ с использованием химических транспортных моделей // Тезисы на-

- учно-практической конференции по проблемам гидрометеорологических прогнозов, экологии, климата Сибири (к 50-летию образования ФГБУ “СибНИГМИ”), г. Новосибирск. 20–22 октября 2021 г.
- Невзоров А.В., Баженов О.Е., Ельников А.В., Логинов В.А.* Взаимодействие интегрального содержания аэрозоля в стратосфере и общего содержания озона // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Тезисы докладов XXVII Международного симпозиума. Томск: Изд-во ИОА СО РАН. 2021а. С.46.
- Невзоров А.В., Баженов О.Е., Ельников А.В., Логинов В.А.* Сравнение временных рядов интегрального содержания аэрозоля в стратосфере и общего содержания озона // Оптика атмосферы и океана. 2021б. Т. 34. № 5. С. 358–363.
- Неробелов Г.М., Аль-Субариа О.Х., Тимофеев Ю.М., Виролайн Я.А., Поберовский А.В., Соломатникова А.А.* Сравнения результатов наземных измерений общего содержания озона вблизи Санкт-Петербурга // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 5. С. 1–7.
- Никифорова М.П., Варгин П.Н., Звягинцев А.М.* Аномалии озонового слоя над территорией России в зимне-весенний период 2015/2016 г. // Метеорология и гидрология. 2019. № 1. С. 36–49.
- Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2020 год. Росгидромет, 2021 г. 205 С.
- Обзор фоновое состояние окружающей природной среды на территории стран СНГ за 2021 г. Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Изraelя, 2022 г. 115 С.
- Панкратова Н.В., Беликов И.Б., Белоусов В.А., Копейкин В.М., Скороход А.И., Штабкин Ю.А., Малафеев Г.В., Флинт М.В.* Концентрация метана, озона, черного углерода, оксидов азота, углерода и содержание $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ над морями российской Арктики (судовые наблюдения) // Океанология. 2020. Т. 60. № 5. С. 685–695.
- Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виролайн Я.А., Козлов Д.А.* Мониторинг общего содержания озона в атмосфере с использованием российской аппаратуры ИКФС-2 // Журн. прикладной спектроскопии. 2019. Т. 86. №4. С. 597–601.
- Пономарёв Н.А., Еланский Н.Ф., Захаров В.И., Веревкин Я.М.* Оптимизация эмиссий загрязняющих примесей для моделирования качества воздуха в Москве. // Процессы в геосредах. 2019. № 1 (19). С. 65–73.
- Пономарев Н.А., Еланский Н.Ф., Кирсанов А.А., Постыляков О.В., Боровский А.Н., Веревкин Я.М.* Применение химико-транспортных моделей атмосферы для валидации эмиссий загрязняющих примесей в Москве // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 2. С. 119–126.
- Радионон В.Ф., Русина Е.Н., Сибир Е.Е.* Многолетние изменения интегральной и спектральной прозрачности атмосферы по данным наблюдений в обсерватории Мирный (Антарктида) // Метеорология и гидрология. 2020. № 2. С. 35–40.
- Ракитин В.С., Еланский Н.Ф., Скороход А.И., Джола А.В., Ракитина А.В., Шилкин А.В., Кириллова Н.С., Казаков А.В.* Долговременные тенденции общего содержания окиси углерода в атмосфере Московского мегаполиса // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 126–136.
- Русина Е.Н., Боброва В.К.* Оптическая плотность и прозрачность атмосферы // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2021 г. Росгидромет, 2022а. С. 31–34.
- Русина Е.Н., Боброва В.К.* Оптическая плотность и прозрачность атмосферы в Арктической зоне Российской Федерации // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2021 год. Росгидромет, 2022б. С. 184–185.
- Рыскин В.Г., Зинченко И.И., Красильников А.А.* Об особенностях распределения озона в стратосфере по результатам одновременных наземных микроволновых измерений в Нижнем Новгороде и Кыргызстане // Метеорология и гидрология. 2012. № 10. С. 24–32.
- 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. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 1. С. 78–91.
- Сибир Е.Е., Радионон В.Ф., Русина Е.Н.* База данных часовых и суточных сумм суммарной радиации на российских антарктических станциях: анализ изменения суммарной радиации за весь период наблюдений в Антарктиде // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67(3). С. 249–260.
- Сибир Е.Е., Радионон В.Ф., Русина Е.Н.* Результаты многолетних наблюдений за общим содержанием озона в Антарктиде и над акваториями Атлантического и Южного океанов // Метеорология и гидрология. 2020. Т. 3. С. 33–43.
- Ситнов С.А., Мохов И.И.* Связь озоновой “мини-дыры” над Сибирью в январе 2016 г. с атмосферным блокированием // Доклады РАН. 2021. Т. 500. № 1. С. 90–95.
- Соломатникова А.А., Волохина Д.Ю., Жукова М.П.* Особенности состояния озонового слоя над регионами РФ // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2021 год. Росгидромет, 2022. С. 36–39.
- Соломатникова А.А., Волохина Д.Ю., Жукова М.П.* Состояние озонового слоя над Арктическими регионами РФ // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2021 год. Росгидромет, 2022. С. 182–183.
- Соломатникова А.А., Ромашкина К.И., Волохина Д.Ю.* Особенности состояния озонового слоя над регионами РФ // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2019 год. Росгидромет, 2020. С. 36–39.
- Соломатникова А.А., Ромашкина К.И., Волохина Д.Ю.,* Особенности состояния озонового слоя над регионами РФ // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2020 год. Росгидромет, 2021. С. 36–39.

- Степанов Е.В., Андреев В.В., Коновальцева Л.В., Касоев С.Г. Приземный озон в атмосфере Москвы во время пандемии COVID-19. // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 8. С. 655–663.
- Степанов Е.В., Андреев В.В., Чупров Д.В., Ивашкин В.Т. Корреляция частоты заражений и смертности от COVID-19 с аномально высоким содержанием озона в приземной атмосфере Москвы летом 2021 года // Рос. Журн. гастроэнтерол., гепатол., колопроктол. 2022. Т. 32. № 3. С. 18–22.
- Тентюков М.П., Лютов В.П., Белан Б.Д., Симоненков Д.В., Головатая О.С. Детектор ультрафиолетового излучения на основе ультрадисперсного оксида магния с кристаллической структурой периклаза // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 11. С. 916–923.
- Тимофеев Ю.М., Неробелов Г.М., Поляков А.В., Виролайн Я.А. Спутниковый мониторинг озоносферы // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 71–79.
- Трифонова-Яковлева А.М., Громов С.А., Ходжер Т.В., Потемкин В.Л., Оболкин В.А. Оценка возможности использования профиля озона высокого разрешения по данным прибора GOME-2 для оценки концентраций приземного озона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 239–247.
- Федорова Е.И., Лапченко В.А., Еланский Н.Ф., Скороход А.И. Изменчивость приземного озона в Карадагском природном заповеднике // Труды IV Всероссийской конференции с международным участием, посвященной памяти академика А.М. Обухова “Турбулентность, динамика атмосферы и климата 2022”, Москва, 22–24 ноября 2022.
- Фролькис В.А., Кароль И.Л., Киселёв А.А. Существует ли связь между квазидвухлетними колебаниями атмосферы и изменениями содержания озона и температуры в Антарктиде? // Труды ГГО. 2021. Вып. 601. С. 19–34.
- Ходжер Т.В., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Дементьева А.Л., Цыдыпов В.В., Балин Ю.С., Пеннер И.Э., Коханенко Г.П., Насонов С.В., Клемашева М.Г., Голобокова Л.П., Потемкин В.Л. Результаты корабельных исследований аэрозольно-газовых примесей над акваторией оз. Байкал летом 2018 г. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 4. С. 289–295.
- Цветкова Н.Д., Варгин П.Н., Лукьянов А.Н., Кирюшов Б.М., Юшков В.А., Хаттатов В.У. Исследование химического разрушения озона и динамических процессов в стратосфере Арктики зимой 2019–20 г. // Метеорология и гидрология. 2021. № 9. С. 70–83.
- Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А. Режим приземного озона на станции Карадаг в Крыму по наблюдениям в 2009–2018 гг // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 2 (372). С. 102–113.
- Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Березина Е.В. Природные и антропогенные факторы сезонной изменчивости приземного озона в Центральной Сибири // V Международная научно-практическая конференция “Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий”. 20–24 мая 2019 г., Майкоп, Россия. Сборник трудов. С. 291–298.
- Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Березина Е.В. Сезонные вариации приземного содержания озона в Северной Евразии: наблюдения и численное моделирование // Всероссийская конференция с международным участием “Турбулентность, динамика атмосферы и климата, посвященная памяти академика А.М. Обухова”, Москва, 10–12 ноября 2020 г.: Тезисы докладов. М.: Физматкнига. 2020. С. 133.
- Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Березина Е.В., Васильева А.В. Влияние дальнего переноса воздушных масс на сезонные вариации и региональный баланс тропосферного озона // Всероссийская конференция с международным участием “Турбулентность, динамика атмосферы и климата, посвященная памяти академика А.М. Обухова”, Москва, 10–12 ноября 2020 г.: Тезисы докладов. М.: Физматкнига, 2020. С. 134.
- Bazhenov O.E. Increased humidity in the stratosphere as a possible factor of ozone destruction in the Arctic during the spring 2011 using Aura MLS observations // International Journal of Remote Sensing. 2019. V. 40. № 9. P. 3448–3460.
- Bazhenov O.E., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Dolgii S.I., Makeev A.P. Disturbance of the stratosphere over Tomsk in winter 2017–2018 using lidar and satellite (Aura MLS) observations // Proceedings SPIE. 2021a. V. 11916. P. 119162J–1–119162J–6.
- Bazhenov O.E., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Dolgii S.I., Makeev A.P. Disturbance of the Stratosphere over Tomsk prior to the 2018 Major Sudden Stratospheric Warming: Effect of ClO Dimer Cycle // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2021b. V. 30. № 2. P. 146–156.
- Bazhenov O.E., Nevzorov A.V., Smirnov S.V., Elnikov A.V., Loginov V.A. Comparison of observations of total ozone content over Tomsk (2006–2020) obtained using three spectrophotometers // Proceedings SPIE. 2022. V.12341.
- Belan B.D., Ancellet G., Andreeva I.S., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Y., Balin Y.S., Barsuk V.E., Belan S.B., Chernov D.G., Davydov D.K., Fofonov A.V., Ivlev G.A., Kotelnikov S.N., Kozlov A.S., Kozlov A.V., Law K., Mikhailchishin A.V., Moseikin I.A., Nasonov S.V., Nédélec P., Okhlopko O.V., Ofkin S.E., Panchenko M.V., Paris J.-D., Penner I.E., Ptashnik I.V., Rasskazhikova T.M., Reznikova I.K., Romanovskii O.A., Safatov A.S., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadnaya T.K., Tolmachev G.N., Yakovlev S.V., Zenkova P.N. Integrated airborne investigation of the air composition over the Russian sector of the Arctic // Atmos. Meas. Tech., 2022. V.15. №13. P.3941–3967.
- Belikov M.V., Kulikov M.Y., Grygalashvily M., Sonnemann G.R., Ermakova T.S., Nechaev A.A., Feigin A.M. Ozone chemical equilibrium in the extended mesopause under the nighttime conditions // Advances Space Research. 2018. V. 61. № 1. P. 426–432.
- Belikov M.V., Ryskin V.G., Kulikov M.Yu., Krasilnikov A.A., Shvetsov A.A., Feigin A.M. Microwave observations of atmospheric ozone over Nizhny Novgorod in winter of

- 2017–2018 // Radiophysics and Quantum Electronics. 2021. V.63. P. 191–206.
- Berezina E., Moiseenko K., Skorokhod A., Elansky N., Belikov I., Pankratova N. Isoprene and monoterpenes over Russia and their impacts in tropospheric ozone formation // Geography, Environment, Sustainability. 2019. V.12. № 1. P. 63–74.
- Berezina E.V., Moiseenko K.B., Skorokhod A.I., Pankratova N.V., Belikov I.B., Belousov V.A., Elansky N.F. Impact of VOCs and NO_x on ozone formation in Moscow // Atmosphere. 2020. V. 11. 1262.
- Berezina E., Moiseenko K., Vasileva A., Pankratova N., Skorokhod A., Belikov I., Belousov V. Emission Ratios and Source Identification of VOCs in Moscow in 2019–2020 // Atmosphere. 2022. V. 13. 257.
- Borovski A.N., Elansky N.F., Ponomarev N.A., Postylyakov O.V. Comparison of measured and simulated by SILAM NO₂ integral content in atmospheric boundary layer in Moscow region // Proceedings SPIE. 2019. V.11 152. P. 111520.
- Borovski A.N., Elokho A.S., Kirsanov A.A., Postylyakov O.V. Measured and simulated integral content of NO₂ in the atmospheric boundary layer in Moscow region in summer // Proceedings SPIE. 2020. V. 11531. P. 1153108.
- Chan K.L., Valks P., Heue K.-P., Lutz R., Hedelt P., Loyola D., Pinardi G., Van Roozendaal M., Hendrick F., Wagner T., Kumar V., Bais A., Piders A., Irie H., Takashima H., Kanaya Y., Choi Y., Park K., Chong J., Cede A., Frieb U., Richter A., Ma J., Benavent N., Holla R., Postylyakov O., Rivera Cárdenas C., Wenig M. Global Ozone Monitoring Experiment-2 (GOME-2) daily and monthly level-3 products of atmospheric trace gas columns // Earth Syst. Sci. Data. 2023. V. 15. P. 1831–1870.
- Dolgi S.I., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Gridnev Yu.V., Kharchenko O.V. Measurements of Ozone Vertical Profiles in the Upper Troposphere–Stratosphere over Western Siberia by DIAL, MLS, and IASI // Atmosphere. 2020a. V. 11. № 2. 196.
- Dolgi S.I., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Gridnev Yu.V., Kharchenko O.V. Temperature Correction of the Vertical Ozone Distribution Retrieval at the Siberian Lidar Station Using the MetOp and Aura Data // Atmosphere. 2020b. V. 11. № 11. P. 1139.
- Dolgi S.I., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V. Comparison of ozone vertical profiles in the upper troposphere–stratosphere measured over Tomsk, Russia (56.5° N, 85.0° E) with DIAL, MLS, and IASI // International Journal of Remote Sensing. 2020b. V.41. № 22. P. 8590–8609.
- Dolgi S.I., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V. Lidar differential absorption system for measuring ozone in the upper troposphere–stratosphere // Journal of Applied Spectroscopy. 2019. V. 85. № 6. P. 1114–1120.
- Dolgi S.I., Nevzorov A.V., Nevzorov A.A., Gridnev Yu.V., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V. Influence of Absorption Cross-Sections on Retrieving the Ozone Vertical Distribution at the Siberian Lidar Station // Atmosphere. 2022. V.13. N2. 293.
- Dorokhov V., Yushkov V., Makshas A., Ivlev G., Tereb N., Savinykh V., Shepelev D., Nakajima H., McElroy C.T., Tarasick D., Goutail F., Pommereau J.-P., Pazmino A. Brewer, SAOZ and ozonesonde observations in Siberia // Atmosphere-Ocean. 2015. V. 53. № 1. P. 14–18.
- Egorova T., Sedlacek J., Sukhodolov T., Karagodin-Doyennel A., Zilker F., Rozanov E. Montreal Protocol's impact on the ozone layer and climate // Atmospheric Chemistry and Physics Discuss., 2022.
- Elansky N.F., Shilkin A.V., Ponomarev N.A., Semutnikova E.G., Zakharova P.V. Weekly patterns and weekend effects of air pollution in the Moscow megacity // Atmospheric Environment. 2020. V. 224. 117303.
- Elansky N.F., Shilkin A.V., Semutnikova E.G., Zaharova P.V., Rakitin V.S., Ponomarev N. A., Verevkin Y.M., Weekly Cycle of Pollutant Concentrations in Near-Surface Air over Moscow // Atmospheric and Oceanic Optics. 2019. V. 32. № 1. P. 85–93.
- Grankin D., Mironova I., Bazilevskaya G., Rozanov E., Egorova T. Atmospheric Response to EEP during Geomagnetic Disturbances // Atmosphere. 2023. V. 14. 273.
- Gruzdev A.N. Accounting for long-term serial correlation in a linear regression problem // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2019. V. 231. 012020. P. 1–10.
- Gruzdev A.N., Elokho A.S. Comparison of the results of ground-based and satellite (OMI) measurements of the NO₂ contents in the stratosphere and troposphere over Zvenigorod: Sensitivity to cloud cover and tropospheric pollution // Proceedings SPIE. 2021a. v. 11916. P. 1191628.
- Gruzdev A.N., Elokho A.S. Long-term trends and interannual variations of the NO₂ contents in the troposphere and stratosphere of the western Moscow region according to results of remote spectrometric measurements of the vertical NO₂ profile // Proceedings SPIE. 2021b. V. 11916. P. 1191627.
- Gruzdev A.N., Elansky N.F., Elokho A.S., Savinykh V.V., Arabov A.Ya., Borovski A.N., Senik I.A. Long-term measurements of total NO₂ and O₃ column contents at stations of the A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences: Observational methods, long-term trends and interannual variations of the species // Proceedings SPIE. 2022a. V. 12341. P. 1234172-1–1234172-6.
- Gruzdev A.N., Elokho A.S. Three decades of remote sensing of NO₂ vertical distribution and column content at the A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2022b. V. 1040. 012027. P. 1–8.
- Gruzdev A.N., Elokho A.S. Trends in total, tropospheric and stratospheric NO₂ contents based on results of ground-based and satellite (OMI) measurements // Proceedings of SPIE. 2022b. V. 12341. P. 123412G-1–123412G-6.
- <https://mosecom.mos.ru>
- <https://www.mos.ru/eco/documents/doklady/view/>
- Iasenko E.A., Marugin A. M., Chelibanov V.P., Chelibanov I.V., Frank-Kamenetskaya O.V., Pinchuk O.A. Chapter 8 Singlet Oxygen in the Lower Atmosphere: Origin, Measurement and Participation // In Processes and Phenomena at the Boundary Between Biogenic and Abiogenic Nature. Springer Nature, Switzerland AG. 2019. P. 137–153.
- Karagodin-Doyennel A., Rozanov E., Sukhodolov T., Egorova T., Saiz-Lopez A., Cuevas C.A., Fernandez R.P., Sherwen T.

- Volkamer R., Koenig T.K., Giroud T., Peter T. Iodine chemistry in the chemistry–climate model SOCOL-AERv2-1 // *Geosci. Model Dev.* 2021. V. 14. P. 6623–6645.
- Karagodin-Doyennel A., Rozanov E., Sukhodolov T., Egorova T., Sedlacek J., Ball W., Peter T. The historical ozone trends simulated with the SOCOLv4 and their comparison with observations and reanalyses // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022a. V. 22. № 23. P. 15333–15350.
- Karagodin-Doyennel A., Rozanov E., Sukhodolov T., Egorova T., Sedlacek J., Peter T. The future ozone trends in changing climate simulated with SOCOLv4 // *Atmospheric Chemistry and Physics Discuss.*, 2022b.
- Khuriganova O., Obolkin V., Akimoto H., Ohizumi T., Khodzher T., Potemkin V., Golobokova L. Long-Term Dynamics of Ozone in Surface Atmosphere at Remote Mountain, Rural and Urban Sites of South-East Siberia, Russia // *Open Access Library Journal*. 2022. V. 3. e2578.
- Kreher K., Van Roozendaal M., Hendrick F., Apituley A., Dimitropoulou E., Frieß U., Richter A., Wagner T., Lampel J., Abuhassan N., Ang L., Anguas M., Bais A., Benavent N., Bösch T., Bognar K., Borovski A., Bruchkouski I., Cede A., Chan K. L., Donner S., Drosoglou T., Fayt C., Finkenzeller H., Garcia-Nieto D., Gielen C., Gómez-Martín L., Hao N., Henzing B., Herman J.R., Hermans C., Hoque S., Irie H., Jin J., Johnston P., Khayyam Butt J., Khokhar F., Koenig T.K., Kuhn J., Kumar V., Liu C., Ma J., Merlaud A., Mishra A.K., Müller M., Navarro-Comas M., Ostendorf M., Pazmino A., Peters E., Pinardi G., Pinharanda M., Piters A., Platt U., Postlyakov O., Prados-Roman C., Puentedura O., Querel R., Saiz-Lopez A., Schönhardt A., Schreier S.F., Seyler A., Sinha V., Spinei E., Strong K., Tack F., Tian X., Tiefengraber M., Tirpitz J.-L., van Gent J., Volkamer R., Vrekoussis M., Wang S., Wang Z., Wenig M., Wittrock F., Xie P.H., Xu J., Yela M., Zhang C., Zhao X. Intercomparison of NO₂, O₄, O₃ and HCHO slant column measurements by MAX-DOAS and zenith-sky UV–visible spectrometers during CINDI-2 // *Atmos. Meas. Tech.* 2020. V. 13. P. 2169–2208.
- Kulikov M.Yu., Belikovich M.V., Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Ermakova T.S., Nechaev A.A., Feigin A.M. Nighttime ozone chemical equilibrium in the mesopause region // *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*. 2018. V. 125, JD026717.
- Kulikov M.Yu., Nechaev A.A., Belikovich M.V., Vorobeva E.V., Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Feigin A.M. Boundary of nighttime ozone chemical equilibrium in the mesopause region from SABER data: Implications for derivation of atomic oxygen and atomic hydrogen // *Geophysical Research Letters*. 2019. V. 46. № 2. P.997–1004.
- Kulikov M.Yu., Belikovich M.V. Nighttime O(¹D) distributions in the mesopause region derived from SABER data // *Ann. Geophys.* 2020a. V. 38. P. 815–822.
- Kulikov M.Yu., Belikovich M.V., Fegin A.M. Analytical investigation of the reaction-diffusion waves in the mesopause photochemistry // *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*. 2020b. V. 125, JD033480.
- Kulikov M.Y., Belikovich M.V., Feigin A.M. The 2-day photochemical oscillations in the mesopause region: the first experimental evidence? // *Geophysical Research Letters*. 2021. V. 48. e2021GL092795.
- Kulikov M.Y., Belikovich M.V., Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Fegin A.M. The revised method for retrieving daytime distributions of atomic oxygen and odd-hydrogens in the mesopause region from satellite observations // *Earth Planets Space*. 2022a. V. 74, 44.
- Kulikov M.Yu., Belikovich M.V., Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Fegin A.M. Retrieving daytime distributions of O, H, OH, HO₂, and chemical heating rate in the mesopause region from satellite observations of ozone and OH* volume emission: The evaluation of the importance of the reaction H + O₃ → O₂ + OH in the ozone balance // *Advances in Space Research*. 2022b. V. 69. № 9. P. 3362–3373.
- Kulikov M.Yu., Belikovich M.V., Chubarov A.G., Dementeva S.O., Fegin A.M. Boundary of nighttime ozone chemical equilibrium in the mesopause region: improved criterion of determining the boundary from satellite data // *Advances in Space Research*. 2023a. V. 71. № 6. P. 2770–2780.
- Kulikov M.Y., Krasil'nikov A.A., Belikovich M.V., Ryskin V.G., Shvetsov A.A., Skalyga N.K., Kukin L.M., Feigin A.M. High Precision Measurements of Resonance Frequency of Ozone Rotational Transition J = 61.5–60.6 in the Real Atmosphere // *Remote Sensing*. 2023b. V. 15, 2259.
- Manney G.L., Santee M.L., Froidevaux L., Hoppel K., Livesey N.J., Waters J.W. EOS MLS observations of ozone loss in the 2004–2005 Arctic winter // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. L04802.
- Mironova I., Sinnhuber M., Bazilevskaya G., Clilverd M., Funke B., Makhmutov V., Rozanov E., Santee M., Sukhodolov T., Ulich T. Exceptional middle latitude electron precipitation detected by balloon observations: implications for atmospheric composition // *Atmos. Chem. Phys.* 2022. V. 22. P. 6703–6716.
- Moiseenko K.B., Vasileva A.V., Skorokhod A.I., Belikov I.B., Repin A.Y., Shtabkin Y.A. Regional Impact of Ozone Precursor Emissions on NO_x and O₃ Levels at ZOTTO Tall Tower in Central Siberia // *Earth and Space Science*. 2021. V. 8. № 7. e2021EA001762.
- Muthers S., Anet J.G., Stenke A., Raible C.C., Rozanov E., Brönnimann S., Peter T., Arfeuille F.X., Shapiro A.I., Beer J., Steinhilber F., Brugnara Y., Schmutz W. The coupled atmosphere–chemistry–ocean model SOCOL-MPIOM // *Geosci. Model Dev.* 2014. V. 7. P. 2157–2179.
- Nerobello G., Timofeyev Yu., Virolainen Y., Polyakov A., Solomatnikova A., Poberovskii A., Kirner O., Al-Subari O., Smyshlyaev S., Rozanov E. Measurements and Modeling of Total Ozone Columns near St. Petersburg, Russia // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. № 16. 3944.
- Nezvorov A.V., Bazhenov O.E., Dolgii S.I., Elnikov A.V., Svyatov S.M. Analysis of annual variations in total ozone content and integrated aerosol backscattering coefficient in the stratosphere over Tomsk // *Proceedings SPIE*. 2019. V. 11208. P. 112088P-1–112088P-4.
- Nezvorov A.V., Bazhenov O.E., Elnikov A.V., Loginov V.A. Interaction of integrated aerosol content in the stratosphere and total ozone content // *Proceedings SPIE*. 2021. V. 11916. 11916 29.

- Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Kharchenko O.V., Makeev A.P.* Development of mobile lidar system for monitoring of tropospheric ozone and aerosol // *Proceedings SPIE*. 2022. V. 12341.
- Obolkin V., Potemkin V., Khuriganova O., Khodzher T.* Ozone Monitoring in the Baikal Region (East Siberia): Spatio-temporal Variability under the Influence of Air Pollutants and Site Conditions // *Atmosphere*. 2022. V. 13. 519.
- Petkov B.H., Vitale V., Di Carlo P., Drofa O., Mastrangelo D., Smedley A.R.D., Solomatnikova A.A., Pavlova K.G.* An unprecedented Arctic ozone depletion event during spring 2020 and its impacts across Europe // *Journal of Geophysical Research. Atmosphere*. 2023. V. 128. e2022JD037581.
- Pikulina P., Mironova I., Rozanov E., Karagodin A.* September 2017 Solar Flares Effect on the Middle Atmosphere // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. 2560.
- Polyakov A., Virolainen Ya., Nerobelov G., Timofeyev Yu., Solomatnikova A.* Total ozone measurements using IKFS-2 spectrometer aboard Meteor M N2 satellite in 2019–2020 // *Int. J. Rem. Sens.* 2021. V. 42. № 22. P. 8709–8733.
- Polyakov A., Virolainen Ya., Nerobelov G., Timofeyev Yu., Solomatnikova A.* Total ozone measurements using IKFS-2 spectrometer aboard MeteorM N2 satellite in 2019–2020 // *Int. J. Rem. Sens.* 2021. V. 42. № 22. P. 8709–8733.
- Ponomarev N., Yushkov V., Elansky N.* Air Pollution in Moscow Megacity: Data Fusion of the Chemical Transport Model and Observational Network // *Atmosphere*. 2021. V. 12. 374.
- Postylyakov O.V., Borovski A.N., Davydova M.A., Makarenkov A.A.* Preliminary validation of high-detailed GSA/Resurs-P tropospheric NO₂ maps with alternative satellite measurements and transport simulations // *Proceedings SPIE*. 2019a. V. 11152. P. 111520F.
- Postylyakov O.V., Borovski A.N., Elansky N.F., Davydova M.A., Zakharova S.A., Makarenkov A.A.* Comparison of space high-detailed experimental and model data on tropospheric NO₂ distribution // *Proceedings SPIE*. 2019b. V. 11208. P. 112082S.
- Postylyakov O.V., Borovski A.N., Shukurov K.A., Mukhartova I.V., Davydova M.A., Makarenkov A.A.* On validation high-detail mapping of tropospheric NO₂ using GSA/Resurs-P observations with simulated data // *Proceedings SPIE*. 2020a. V. 11531. P. 1153109.
- Postylyakov O., Borovski A., Kirsanov A., Vasileva A., Elansky N.* Comparison of measured and simulated NO₂ integral content in the lower troposphere in Moscow region // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020b. V. 489, 012035.
- Safronov A.N., Shtabkin Yu.A., Berezina E.V., Rakitin V.S., Skorokhod A.I., Belikov I.B., Elansky N. F.* Isoprene, methyl vinyl ketone and methacrolein from TROICA-12 measurements and WRF-CHEM and GEOS-CHEM simulations in the Far East region // *Atmosphere*. 2019. V. 10. 152.
- Savinykh V.V., Elansky N.F., Gruzdev A.N.* Interannual variations and long-term trends in total ozone over the North Caucasus // *Atmospheric Environment*. 2021a. V. 251. 118252. P. 1–10.
- Savinykh V.V., Gruzdev A.N., Elansky N.F.* Trends and variations in total ozone over the North Caucasus // *Proceedings SPIE*. 2021b. V. 11916. P. 119162S.
- Schmidt H., Brasseur G.P., Charron M., Manzini E., Giorgetta M.A., Diehl T., Fomichev V.I., Kinnison D., Marsh D., Walters S.* The HAMMONIA Chemistry Climate Model: Sensitivity of the Mesopause Region to the 11-Year Solar Cycle and CO₂ Doubling // *J. Climate*. 2006. V. 19. 3903.
- Shukurov K.A., Postylyakov O.V., Borovski A.N., Shukurova L.M., Gruzdev A.N., Elovkhov A.S., Savinykh V.V., Mokhov I.I., Semenov V.A., Chkhetiani O.G., Senik I.A.* Study of transport of atmospheric admixtures and temperature anomalies using trajectory methods at the A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. V. 231(1). 012048.
- Skorokhod A.I., Rakitin V.S., and Kirillova N.S.* Impact of COVID-19 Pandemic Preventing Measures and Meteorological Conditions on the Atmospheric Air Composition in Moscow in 2020 // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2022. V. 47. № 3. P. 183–190.
- Smyshlyaev S.P., Vargin P.N., Motsakov M.A.* Numerical modeling of ozone loss in the exceptional Arctic stratosphere winter-spring of 2020 // *Atmosphere*. 2021. V. 12. 1470.
- Stepanov E., Kotelnikov S.* Tropospheric ozone as a risk factor for crop production in central regions of Russia // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019. V. 390. 012033.
- Stepanov E.V.* Data parallel processing in block streams for analysis of long-term series of ozone content in ground atmosphere // *Laser Phys*. 2022. V. 32. N8. 084011.
- Sukhodolov T., Egorova T., Stenke A., Ball W. T., Brodowsky C., Chiodo G., Feinberg A., Friedel M., Karagodin-Doyennel A., Peter T., Sedlacek J., Vattioni S., Rozanov E.* Atmosphere-Ocean-Aerosol-Chemistry-Climate Model SOCOLv4.0: description and evaluation // *Geosci. Model Dev*. 2021. V. 14. P. 5525–5560.
- Tsydypov V.V., Zayakhanov A.S., Zhamsueva G.S., Dementeva A.L., Balzhanov T.S., Sungrapova I.P., Naguslaev S.A.* Features of the spatial distribution of gaseous impurities in the atmosphere of the South-Eastern coast of Lake Baikal by route measurements in the summer period 2018–2019 // *Limnology and Freshwater Biology*. 2020. № 4. P. 892–893.
- Thorpe T., Arnold S.R., Pope R.J., Spracklen D.V., Conibear L., Knote C., Arshinov M., Belan B., Asmi E., Laurila T., Skorokhod A.I., Nieminen T., and Petäjä T.* Late-spring and summertime tropospheric ozone and NO₂ in western Siberia and the Russian Arctic: regional model evaluation and sensitivities // *Atmos. Chem. Phys*. 2021. V. 21. P. 4677–4697.
- Tsvetkova N.D., Vyzankin A.S., Vargin P.N., Lukyanov A.N., Yushkov V.A.* Investigation and forecast of Sudden Stratospheric Warming events with chemistry climate model SOCOL // *IOP Conf. Series, Earth Environmental Science*. 2020. V. 606. 012062.
- Vargin P.N., Kostrykin S.V., Volodin E.M., Pogoreltsev A.I., Wei K.* Arctic Stratosphere Circulation Changes in the 21st Century in Simulations of INM CM5 // *Atmosphere*. 2022. V. 13. 25.

- Wang Y., Apituley A., Bais A., Beirle S., Benavent N., Borovski A., Bruchkouski I., Chan K.L., Donner S., Drosoglou T., Finkenzeller H., Friedrich M.M., Friß U., Garcia-Nieto D., Gómez-Martín L., Hendrick F., Hilboll A., Jin J., Johnston P., Koenig T. K., Kreher K., Kumar V., Kyuberis A., Lampel J., Liu C., Liu H., Ma J., Polyansky O.L., Postlyakov O., Querel R., Saiz-Lopez A., Schmitt S., Tian X., Tirpitz J.-L., Van Roozendael M., Volkamer R., Wang Z., Xie P., Xing C., Xu J., Yela M., Zhang C., Wagner T. Inter-comparison of MAX-DOAS measurements of tropospheric HONO slant column densities and vertical profiles during the CINDI-2 campaign // *Atmos. Meas. Tech.* 2020. V. 13. P. 5087–5116.
- Zakharova S.A., Elansky N.F., Verevkin Y.M., Davydova M.A. Determination of Emissions in the City by the Rate of Change in the Integral Content of Impurities in the Atmospheric Boundary Layer // *Doklady Earth Sciences*. 2022. V. 504. № 1. P. 326–331.
- Zakharova S., Davydova M., Borovski A., Shukurov K., Mukharotova Y., Makarenkov A., Postlyakov O. Experiments on high-detailed mapping of tropospheric NO₂ using GSA/Resurs-P observations: results, validation with models and measurements, estimation of emission power // *Proceedings SPIE*. 2021. V. 11859. P. 1185905.
- Zayakhanov A.S., Zhamsueva G.S., Tsydyrov V.V., Balzhanov T.S., Balin Yu.S., Penner I.E., Kokhanenko G.P., Na-sonov S.V. Specific features of transport and transformation of atmospheric aerosol and gas admixtures in the coastal zone of Lake Baikal // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2019. V. 32 № 2. P. 158–164.
- Zayakhanov A.S., Zhamsueva G.S., Tsydyrov V.V., Balzhanov T.S., Dementeva A.L., Khodzher T.V. Investigation of Transport and Transformation of Tropospheric Ozone in Terrestrial Ecosystems of the Coastal Zone of Lake Baikal // *Atmosphere* 2019. V. 10. P. 739.
- Zhamsueva G., Zayakhanov A., Tsydyrov V., Dementeva A., Balzhanov T. Spatial-Temporal Variability of Small Gas Impurities over Lake Baikal during the Forest Fires in the Summer of 2019 // *Atmosphere*. 2021. V. 12. P. 188.
- Zhamsueva G., Zayakhanov A., Khodzher T., Tsydyrov V., Balzhanov T., Dementeva A. Studies of the Dispersed Composition of Atmospheric Aerosol and Its Relationship with Small Gas Impurities in the Near-Water Layer of Lake Baikal Based on the Results of Ship Measurements in the Summer of 2020 // *Atmosphere* 2022. V. 13. P. 139.

Russian Investigations of Atmospheric Ozone and its Precursors in 2019–2022

V. V. Andreev^{1, *}, O. E. Bazhenov², B. D. Belan², P. N. Vargin³, A. N. Gruzdev⁴, N. F. Elansky⁴, G. S. Zhamsueva⁵, A. S. Zayakhanov⁵, S. N. Kotel'nikov⁶, I. N. Kuznezova⁷, M. Yu. Kulikov⁸, A. V. Nevzorov², V. A. Obolkin⁹, O. V. Postlyakov⁴, E. V. Rozanov¹⁰, A. I. Skorokhod^{4, 12}, A. A. Solomatnikova¹¹, E. V. Stepanov^{1, 6}, Yu. M. Timofeyev¹⁰, A. M. Feigin⁸, and T. V. Khodzher⁹

¹RUDN, Miklukho-Maklaya str.6, Moscow, 117198 Russia

²Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuevsquare, Tomsk, 634055 Russia

³Central Aerological Observatory, 3, Pervomayskaya str., Dolgoprudnii, Moscow region, 141701 Russia

⁴Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3, Pyzhyovskiy pereulok, Moscow, 119017 Russia

⁵Institute of Physical Materials Science SB RAS, 6, Sakh'yanova str., Ulan-Ude, 670047 Russia

⁶Prokhorov General Physics Institute RAS, 38, Vavilova str., Moscow, 119991 Russia

⁷Hydrometcenter of Russia, 13, building 1, Bolshoy Predtechensky lane, Moscow, 123242 Russia

⁸Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics RAS, 46 Ul'yanov Street, Nizhny Novgorod, 603950 Russia

⁹Limnological Institute SB RAS, 3, Ulan-Batorskaya, Irkutsk, 664033 Russia

¹⁰St. Petersburg University, 7-9 Universitetskaya Embankment, St. Petersburg, 199034 Russia

¹¹Voeikov Main Geophysical Observatory, 7, Karbysheva str., St. Petersburg, 194021 Russia

¹²Department of Meteorology and Geophysics, University of Vienna, 2, Josef-Holaubek-Platz, Vienna, 1090 Austria

*e-mail: bbd@iao.ru

The review contains the most significant results of the work of Russian scientists in the field of atmospheric ozone research performed in 2019–2022. It considers observations of tropospheric ozone, its distribution and variability in the territory of the Russian Federation, the relationship with atmospheric parameters, modeling of education processes and the impact on public health. The state of stratospheric ozone over the region, modeling of processes in the ozonosphere, developed methods and instruments were also analyzed. The review is part of Russia's national report on meteorology and atmospheric sciences, which was prepared for the International Association for Meteorology and Atmospheric Sciences (IAMAS). The report was reviewed and approved at the XXVIII General Assembly of the International Geodetic and Geophysical Union (IUGG).

Keywords: atmosphere, ozone, ozone layer, atmosphere composition, small gas impurities, air quality, ozone chemistry, transport processes