

Оригинальная статья / Original article
УДК:504.3.054
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-22



Изучение концентраций приземного озона в воздухе промышленного российского города

Татьяна Г. Крупнова¹, Ольга В. Ракова¹, Валерий М. Кочегоров²

¹Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

²Челябинский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – филиал ФГБУ «Уральское УГМС», Челябинск, Россия

Контактное лицо

Татьяна Г. Крупнова, кандидат химических наук, доцент, кафедра экологии и химической технологии, Южно-Уральский государственный университет; 454080 Россия, г. Челябинск, пр. Ленина, 76.
Тел. +79642444419
Email krupnovatg@susu.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0862-710X>

Формат цитирования

Крупнова Т.Г., Ракова О.В., Кочегоров В.М.
Изучение концентраций приземного озона в воздухе промышленного российского города // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 240-254. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-22

Получена 8 июня 2025 г.

Прошла рецензирование 20 сентября 2025 г.

Принята 25 октября 2025 г.

Резюме

Целью настоящей работы был анализ сезонных изменений концентраций приземного озона (ПО), изучение случаев превышения предельно допустимых концентраций (ПДК), эпизодов экстремально высоких концентраций (ЭВКО) и ночных повышений содержания озона (НПСО) для предложения механизмов описанных явлений и эффективных стратегий достижения установленных нормативов. В ходе работы были изучены концентрации приземного озона и его предиктов на посту государственного мониторинга состояния атмосферного воздуха в течение 2019–2021 гг. в городе Челябинске. Согласно результатам исследований, было выявлено, что концентрация ПО на территории города Челябинска начинает увеличиваться в марте и остается высокой в течение лета. Концентрация ПО складывается из нескольких составляющих: (1) поступающего из нижней стратосферы и верхних слоев тропосферы в результате стратосферных вторжений (СВ), которые увеличиваются в летний период; (2) фотохимически образующегося с максимумом в июне, при этом рассчитанное на основании данных наземного мониторинга соотношения НСНО/NO_x не может быть использовано в качестве надежного индикатора режима образования ПО; и (3) поступающего с низкоуровневыми мезоструйными течениями (НУМСТ), частота возникновения которых увеличивается в ночной период весной и летом, о чем свидетельствует высокая повторяемость НПСО.

Ключевые слова

Приземный озон (ПО), режим образования озона, эпизоды экстремально высоких концентраций озона (ЭВКО), ночные повышения содержания озона (НПСО), стратосферные вторжения (СВ), низкоуровневые мезоструйные течения (НУМСТ).

Study of surface ozone concentrations in the air of an industrial Russian city

Tatyana G. Krupnova¹, Olga V. Rakova¹ and Valeriy M. Kochegorov²

¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

²Chelyabinsk Centre for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Rosgidromet), Chelyabinsk, Russia

Principal contact

Tatyana G. Krupnova, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Ecology and Chemical Engineering, South Ural State University; 76 Lenin Prospekt, Chelyabinsk, Russia 454080.

Tel. +79642444419

Email krupnovatg@susu.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0862-710X>

How to cite this article

Krupnova T.G., Rakova O.V., Kochegorov V.M. Study of surface ozone concentrations in the air of an industrial Russian city. *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(4):240-254. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-22

Received 8 June 2025

Revised 20 September 2025

Accepted 25 October 2025

Abstract

The aim of this work was to analyse seasonal changes of surface ozone concentrations (SO), to study cases of exceeding maximum permissible concentrations (MPC), extreme ozone episodes (EOEs) and nocturnal ozone enhancement (NOE) in order to propose mechanisms for the phenomena described and effective strategies for achieving established standards. In the course of the work, the concentrations of SO and its predicates were studied at the state air monitoring station in the city of Chelyabinsk during 2019–2021. According to the research results, it was revealed that the SO concentration in the Chelyabinsk urban area begins to increase in March and remains high during the summer. The SO concentration consists of several components: (1) that transported from the lower stratosphere and the upper layers of the troposphere as a result of stratospheric invasions (SI), which increase in summer; (2) that formed photochemically with a maximum in June: while the HCHO/NO_x ratio calculated on the basis of ground-based monitoring data cannot be used as a reliable indicator of SO formation; and (3) that incoming with low-level jets (LLJs), the frequency of which increases during the night in spring and summer, as evidenced by the high frequency of NOE.

Key Words

Surface ozone (SO), ozone formation regime, extreme ozone episodes (EOEs), nocturnal ozone enhancement (NOE), stratospheric invasions (SIs), Low-level jets (LLJs).

ВВЕДЕНИЕ

Приземный озон (ПО) – это атмосферный загрязнитель, представляющий значительную угрозу для экосистем и здоровья человека. ПО может вызывать першение, кашель и отек горла [1]. Люди, у которых диагностирована астма, хронические респираторные заболевания, аллергии,

эмфизема, дети и пожилые – это группы населения, обладающие особой чувствительностью к повышенным концентрациям ПО. Предельно допустимые концентрации озона зависят от региона, в табл. 1 представлены некоторые из них.

Таблица 1. Нормативные значения концентраций ПО для различных регионов**Table 1.** Limit values of SO for different regions

Страна / Регион Country / Region	Допустимый уровень озона (млрд ⁻¹) Limit value of ozone (ppb)	Время усреднения, ч Time averaging, h
ВОЗ / WHO	50	8
ЕС / EU	60	8
США / USA	70	8
Соединенное королевство Великобритании United Kingdom of Great Britain	50	8
Канада / Canada	62	8
Китай China	100 80	1 8
Индия India	90 50	1 8

Европейская директива о качестве воздуха (Директива 2008/50/ЕС) устанавливает целевое значение в 60 ppb для максимальной среднесуточной 8-ми часовой концентрации (МСК8-О₃), которое не может быть превышено более чем в течение 25-ти дней в календарном году, в среднем за 3 года. В Руководящих принципах ВОЗ по качеству воздуха установлен целевой показатель МСК8-О₃ 50 ppb, который не должен быть превышен в течении 4-х дней календарного года и 30 ppb как максимальное среднее значение МСК8-О₃ за 6 месяцев [1]. Недавнее исследование показало, что примерно 12,2 % населения земного шара (261 город) проживает в районах с высокой концентрацией ПО, превышающей установленные нормативы. Таким образом, примерно 36,32 миллиона человек ежегодно подвергаются воздействию вредных концентраций ПО [2].

Уровень содержания ПО в атмосферном воздухе зависит от концентрации его прекурсоров, к которым относятся такие вещества как оксиды азота (NO_x = NO₂+NO) и летучие органические соединения (ЛОС) [3]. Методы анализа ЛОС часто являются трудоемкими, поэтому во многих исследованиях для оценки общего уровня ЛОС [4] используется концентрация формальдегида (НСНО), так как он является продуктом кратковременного окисления многих ЛОС и промежуточным продуктом окисления почти всех ЛОС [5]. Нет сомнений в том, что концентрации ПО, ЛОС и NO_x тесно взаимосвязаны. ЛОС окисляются в тропосфере с образованием ПО. Однако, чем больше выделяется NO_x, тем меньше образуется ПО, поскольку NO_x оттитровывают ПО. Таким образом, возможно увеличение содержания ПО за счет снижения выбросов NO_x. Следовательно, зависимость образования ПО от прекурсоров является нелинейной. Чувствительность к образованию озона может быть оценена с помощью показателя FNR, равного соотношению НСНО/NO_x, полученного как с помощью технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), так и наземных мониторинговых измерений [6]. Можно выделить несколько режимов образования ПО: ЛОС-лимитированный, NO_x-лимитированный и переходный. В случае режима с ограниченным содержанием ЛОС (с высоким содержанием NO_x), сокращение выбросов ЛОС

приводит к уменьшению химического образования органических радикалов. Это приводит к уменьшению круговорота NO_x и, следовательно, к снижению концентрации ПО. В случае режима с ограниченным содержанием NO_x (высоким содержанием ЛОС) сокращение выбросов NO_x приводит к уменьшению фотолиза NO₂, который является основным источником свободных атомов кислорода. В режиме с ограниченным содержанием NO_x снижение выбросов NO_x приводит к снижению содержания ПО в окружающей среде. Напротив, в режиме с ограниченным содержанием ЛОС поступление NO_x в окружающую среду способствует снижению содержания ПО, а снижение выбросов NO_x способствует образованию ПО [7]. Многие исследования, посвященные FNR, не выявили конкретного порога значений данного соотношения, который мог бы обобщить глобальный режим контроля за образованием озона, поскольку он определяется различиями в атмосферной среде, неоднородностью поверхности и региональными особенностями. Но выявление тенденций к увеличению или уменьшению НСНО/NO_x может быть полезно для определения доминирующего фактора в чувствительности ПО к NO_x-ЛОС [6]. Также, в настоящее время невозможно объяснить конкретное фоновое содержание ПО в том или ином регионе. Однако последние исследования показали, что даже если мы сведем к нулю все выбросы ЛОС, количество ПО все равно будет значимым [8]. Было показано, что атмосферный фон Восточной Азии, определяемый путем обнуления всех антропогенных выбросов, очень высок и составляет порядка 55 ppb. Причина этого явления пока неясна. Есть данные [9–11], что стратосферно-тропосферный обмен является важным процессом для обеспечения баланса озона свободной тропосфере. В качестве индикатора для оценки содержания ПО, поступающего в нижние слои атмосферы из стратосферы и верхних слоев тропосферы [12] путем так называемых стратосферных вторжений (СВ) может быть использован изотоп ⁷Be (период полураспада 53,22 дня), природный радионуклид, который образуется в верхней тропосфере (30 %) и нижней стратосфере (70 %). На концентрацию ПО также влияют местные метеорологические факторы, такие как солнечная

радиация, температура, облачный покров, относительная влажность, скорость и направление ветра [13]. Существуют исследования, в которых сообщается об экстремальных высоких концентрациях озона (ЭВКО), фиксирующихся в разное время во всем мире [14–16]. Исследования показали, что некоторые локальные экстремальные метеорологические явления, такие как температурная инверсия (ТИ), благоприятствуют образованию и накоплению ПО, что приводит к эпизодам экстремального загрязнения [17–21]. Уровни загрязнения воздуха ПО обычно достигают максимума утром-днем, а затем к вечеру снижаются. Однако, в некоторых исследованиях сообщалось о ночном повышении содержания озона (НПСО) и ночных пиках озона (НПО) [22–24]. Концентрация ПО и ночью может оставаться на высоком уровне, повышая способность атмосферы к окислению в ночное время, и иногда даже превышать дневной пик [25; 26]. Эти явления активно изучались в последние годы, но результаты исследований крайне противоречивы, а исследования концентраций ПО в городах России крайне ограничены. В нашем предыдущем исследовании мы изучали сезонные и суточные колебания приземного содержания ПО, а также источники его прекурсоров [27]. Мы обнаружили, что для территории Южного Урала характерны весенний и летний пики озона, а суточный ход во многом определяется выбросами оксидов азота предприятиями теплоэнергетики. Уникальная возможность проверить различные гипотезы накопления в воздухе высоких концентраций ПО представилась во время локдауна 2020 года, вызванного всемирной пандемией Covid-19 [28]. В предыдущей работе [29] мы впервые использовали анализ соотношения HCHO/NO_2 (FNR), полученного на основании данных ДЗЗ.

Для разработки стратегии снижения концентрации ПО в работе были использованы данные мониторинга озона и его предиктов в доковидный 2019 год, во время локдауна (2020 год) и в последующий период в течение 2021 года. Основной целью настоящей работы был анализ сезонных изменений концентраций приземного озона (ПО), изучение случаев превышения предельно допустимых концентраций (ПДК), экстремально высоких концентраций (ЭВКО) и ночных повышений содержания озона (НПСО) для предложения механизмов описанных явлений и выработки эффективных стратегий достижения установленных нормативов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе работы были использованы данные с поста государственного мониторинга качества воздуха, расположенного вдали от основных промышленных предприятий г. Челябинска и крупных автомагистралей. Замеры ПО производились с помощью автоматического газоанализатора, принцип действия которого основан на фотометрическом анализе в УФ диапазоне Ф-105 (ОПТЭК, Россия). Калибровка осуществлялась по стандартам, полученным с помощью генератора озона. Оксиды азота NO и NO_2 измеряли с использованием хемилюминесцентного анализатора Р-310 (ОПТЭК, Россия). Замеры на автоматических газоанализаторах производились круглосуточно каждые 20 минут. Концентрацию формальдегида в воздухе определяли четыре раза в сутки фотометрическим методом анализа с фенилгидразином, используя спектрофотометр UNICO 1201 (United Products & Instruments, Inc., США). Все измерения были пересчитаны в ppb (млрд^{-1}), поскольку эта единица измерения наиболее часто используется в

международной практике, что позволило сравнивать полученные результаты с зарубежными исследованиями, так как одной из задач было определить причины аномальных увеличений концентраций озона в ночное время и эпизодов экстремально повышенных значений ПО. Российских работ в этом направлении, насколько нам известно, нет и представленная работа является пионерной, по крайней мере для промышленного города, расположенного в материковой части РФ.

Изотоп ^7Be использовался в качестве трассера (химического индикатора вторжения атмосферных воздушных масс из высокой тропосферы и низкой стратосферы в приземные слои) [30]. Измерения удельной активности ^7Be (в $\text{мБк}\cdot\text{м}^{-3}$) были получены с помощью гамма-спектрометрического анализа после того, как образцы аэрозоля были собраны на фильтровальной бумаге с использованием пробоотборников воздуха. Мы использовали гамма-спектрометр с цифровой обработкой сигналов DSPEC jr 2.0 (AMETEK (торговая марка "ORTEC"), США).

Для диагностики влияния метеорологических условий на содержание ПО использовали данные метеорологической станции Vantage Pro2 Plus (Davis Instruments, США). Проводились замеры почасовой температуры воздуха в $^{\circ}\text{C}$ (Т), относительной влажности в % (RH), солнечной радиации в $\text{Вт}/\text{м}^2$ (SR), дозы УФ излучения (UVD), УФ-индекса (UVI), скорости ветра в $\text{м}/\text{с}$ (WS), направления ветра (WDIR).

Для анализа температурных инверсий (ТИ) использовались данные температурного профилимера МТП-5 (Россия) [31].

Методология исследования заключалась в следующем. Был проанализирован годовой ход ПО, оксидов азота и формальдегида за 2019–2021 гг. Для расчета среднемесячных концентраций ПО были использованы MCK8-O_3 (ppb), полученные для каждого календарных суток путем расчета 24 возможных 8-часовых средних значения концентраций ПО. При этом MCK8-O_3 принималась как наивысшая из 24-х рассчитанных значений. Для получения среднемесячных концентраций формальдегида и оксидов азота использовали среднесуточные значения, рассчитанные с использованием 72-х измерений каждые 20 минут.

Для оценки режима фотохимического образования озона использовали максимально разовые концентрации ПО, оксидов азота и формальдегида, измеренные в 13:00 по местному времени (что максимально приближено к полудню, выбор времени также обусловлен утвержденным графиком отбора проб формальдегида). Использование полуденных концентраций позволило отделить фотохимически образовавшийся ПО от фоновых значений, предположительно вызванных вертикальным и горизонтальным переносом. Для расчета наземно-измеренного FNR (соотношения HCHO/NO_x) использовали концентрацию формальдегида, измеренную фотометрически в 13:00 и суммарную концентрацию моно- и диоксида азота, в ppb. Дни, когда одна из концентраций по тем или иным причинам (ошибка измерения, не сохранившиеся данные на сервере, значение ниже предела обнаружения) отсутствовала или равнялась нулю, отбрасывали. Для каждого года наблюдения были получены регрессионные модели (линейная, логарифмическая, обратная, квадратичная, кубическая, показательная, степенная, S-кривая, растущая, экспоненциальная, логистическая) зависимости концентрации ПО от FNR. Для оценки эффективности

модели использовали значение R^2 . В каждую модель была включена константа, которая условно была принята за фоновое значение ПО. Полученные значения фоновой концентрации были сопоставлены со среднегодовой концентрацией ^{7}Be в аэрозолях, полученной путем расчета среднего значения за 12 месяцев года, для проверки гипотезы о наличии СВ.

Было изучено явление ночного повышения концентраций ПО. Данное исследование определяет событие НПСО как повышение концентрации озона в ночное время на >5 ppb в течение часа с последующим снижением на <5 ppb в последующий час. Если концентрация ПО увеличивается более чем на 5 ppb несколько раз в течение одной и той же ночи, это увеличение считается частью единичного явления НПСО. Ночной пик озона (НПО) обозначает самую высокую концентрацию ПО, наблюдаемую во время явления НПСО [26; 32]. Следует иметь в виду следующее ограничение

нашего исследования. Нами было принято, что наличие НПСО является указанием на формирование низкоуровневых мезоструйных течений (НУМСТ) в геолокации поста государственного мониторинга качества воздуха. Для точного подтверждения данной гипотезы в дальнейших исследованиях необходимо использование лидара, позволяющего измерять концентрации озона, либо запуск зонда, измеряющего концентрацию озона на различных высотах.

Для анализа повышенных концентраций озона были проанализированы два типа дней. Во-первых, это дни, когда наблюдалось превышение ПДК среднесуточных за 8-ми часовой интервал, то есть были выбраны дни с МСК8-О_3 более 50 ppb. Во-вторых, мы использовали индекс качества воздуха (ИКВ) [18], который классифицирует приземные пороговые значения содержания ПК по пяти категориям (табл. 2) [9].

Таблица 2. Индекс качества воздуха (ИКВ) на основе МСК8-О_3 и риски для здоровья (согласно [33])

Table 2. Air quality index (AQI) based on MDA8-О_3 and health risks (according to [33])

ИКВ (цветовое обозначение) AQI (Color)	Категория качества воздуха Air quality category	Величина ИКВ Value of AQI	МСК8-О_3 , млрд ⁻¹ MDA8-О_3 , ppb	Описание качества воздуха и рисков для здоровья Description of air quality and health risk
Зеленый Green	Хорошее Good	0–50	<55	Качество воздуха удовлетворительное, загрязнение воздуха практически не представляет опасности Air quality is satisfactory, air pollution is practically harmless
Желтый Yellow	Умеренная Moderate	51–100	<71	Качество воздуха приемлемое, однако, для некоторых людей, особенно для тех, кто особенно чувствителен к загрязнению воздуха, может представлять опасность Air quality is acceptable. However, there may be a risk for some people, particularly those who are unusually sensitive to air pollution
Оранжевый Orange	Вредное для здоровья чувствительных групп Unhealthy for Sensitive Groups	101–150	<86	Члены уязвимых групп населения могут испытывать последствия для здоровья, но мало вероятно, что это затронет население в целом Members of sensitive groups may experience health effects. The general public is less likely to be affected
Красный Red	Вредное для здоровья Unhealthy	151–200	<106	У представителей уязвимых групп населения могут возникнуть более серьезные последствия для здоровья Some members of the general public may experience health effects; members of sensitive groups may experience more serious health effects
Фиолетовый Purple	Очень вредное для здоровья Very Unhealthy	201–300	<201	Предупреждение для здоровья: риск последствий для здоровья повышается для всех Health alert: the health risk is increased for everyone

Отметим, что в отличие от РФ, где приняты очень жесткие стандарты качества воздуха и экологическое законодательство основывается на концепции ПДК, разработанной еще группой профессора Рязанова в 1951, в основе которой лежит набор медико-биологических показателей, за рубежом в настоящее время наблюдается больший переход на концепцию рисков. И в зарубежных публикациях к случаям экстремально высоких концентраций озона относят

красную и фиолетовую области опасности (табл. 2). Однако, в соответствии с принятыми в РФ концепциями оценки рисков, а также наблюдаемого в настоящее время тренда на увеличение уязвимых групп населения (рост количества больных с аллергией, бронхиальной астмой, малоизученные негативные последствия пандемии COVID-19) в данной работе к случаям экстремально высоким концентрациям озона (ЭВКО)

относили дни, начиная с желтого уровня опасности, которые соответствуют $\text{МСК8-О}_3 \geq 86$ ppb.

Для оценки связи между ПО и метеопараметрами использовали корреляционные коэффициенты Спирмена. Результаты всех измерений были обработаны с использованием программного обеспечения Microsoft Excel 2013 и IBM SPSS 27.0.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Годовой ход концентрации ПО и его предиктов в 2019–2021 гг. представлен на рис. 1, для него характерен рост

концентрации ПО весной и летом, и снижение – осенью и зимой. Летний максимум ПО наблюдался в июне на протяжении всех трех исследуемых лет. Он совпадает с солнечным максимумом и объясняется максимумом фотохимического синтеза озона. Весенний максимум – плавающий. В целом, рост концентрации озона весной характерен для всего Евразийского континента, его существование объясняется рядом геоклиматических и атмосферных явлений [34].

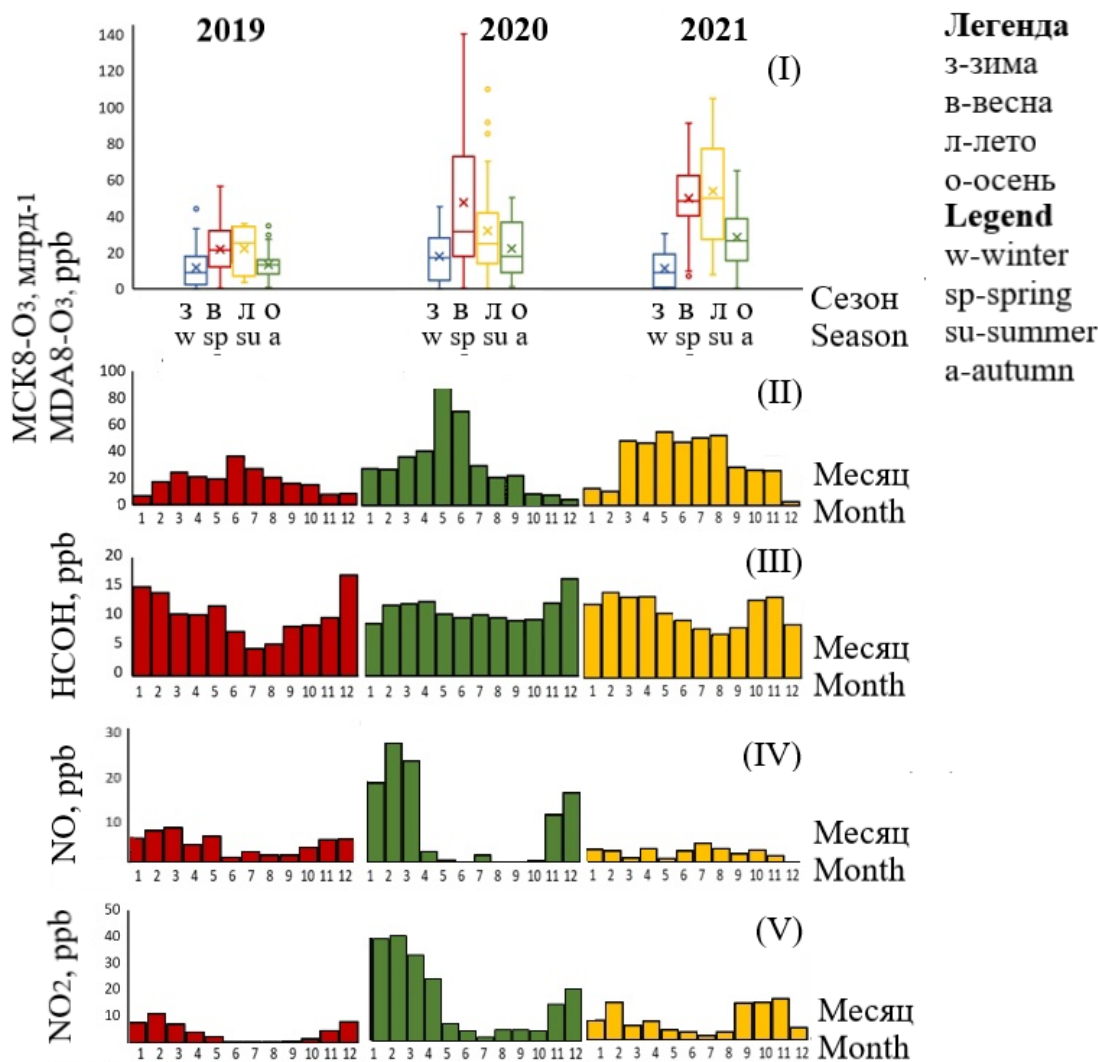


Рисунок 1. Сезонные (I) и месячные (II) значения МСК8-О_3 , среднесуточных концентраций НСОН (III), NO (IV) и NO_2 (V) в 2019–2021 гг. “Ящики” представляют 25-й процентиль (нижний край), медиану (сплошная линия), среднее значение (точка с пунктирной линией) и 75-й процентиль (верхний край). “Усы” над и под “ящиком” указывают на 90-й процентиль и 10-й процентиль

Figure 1. Seasonal (I) and monthly (II) variations of MDA8-O_3 , average daily HCON (III), NO (IV) and NO_2 (V) concentrations in 2019–2021. The boxes represent the 25th percentile (lower edge), median (solid line), mean (dot with dashed line), and 75th percentile (upper edge). The “whiskers” above and below the box indicate the 90th percentile and 10th percentile

Высокие концентрации оксидов азота в отопительный сезон фиксировались во все годы наблюдений. Это хорошо согласуется с предыдущими исследованиями [27], где было показано, что суточный ход концентраций оксидов азота совпадает с суточным ходом производительности ТЭЦ, и не зависит от интенсивности транспортных потоков (часы пик) в городе. Таким образом, можно однозначно говорить о том, что основной вклад в эмиссию оксидов азота в городе Челябинске вносит деятельность городских и промышленных ТЭЦ.

На рис. 1 видно, что в городе Челябинске наблюдается аномальный годовой ход концентраций формальдегида с некоторым незначительным, но очевидным трендом на снижение в течение летних месяцев. Обычно, концентрация формальдегида значительно увеличивается летом из-за увеличения выбросов биогенных ЛОС и фотохимических превращений. Такой аномальный годовой ход формальдегида может быть связан с механизмом вертикального перемешивания и эффектом разбавления в

результате тепловой конвекции и увеличения планетарного пограничного слоя (ППС), который летом может простирается на несколько километров. Зимой формальдегид, выделяющийся из антропогенных и природных источников, накапливается в более низком слое перемешивания, совпадающем в большинстве

случаев с высотой нижней границы приподнятой инверсии [31; 34]. Для зимнего периода в Челябинске характерен антициклонный тип погодных условий, блокирующие длительные антициклоны провоцируют более частое образование приземных и приподнятых инверсий (рис. 2).

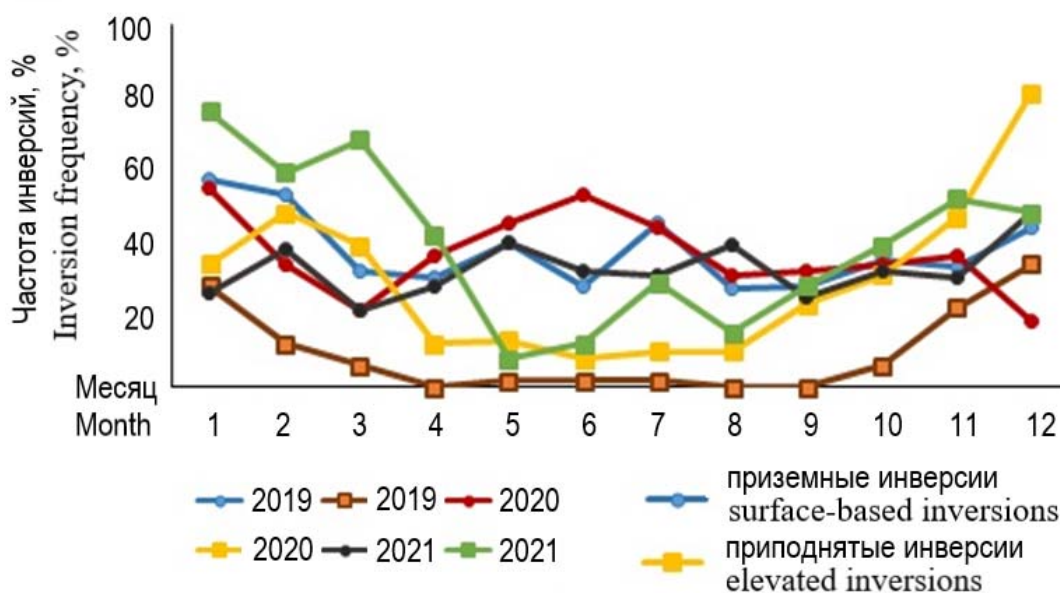


Рисунок 2. Частота температурных инверсий в Челябинске в 2019–2021 гг.

Figure 2. Frequency of temperature inversions in Chelyabinsk in 2019–2021

Температурные инверсии наблюдаются чаще зимой, чем летом (рис. 2), препятствуют разбавлению и рассеиванию загрязняющих веществ и способствуют накоплению формальдегида в приземном слое именно в зимний период. Дополнительной причиной снижения концентрации формальдегида летом могут быть процессы сухого осаждения. Усиление активности растительности летом может увеличить сухое осаждение формальдегида на поверхности листьев, что еще больше снижает его концентрацию в приземном слое [35].

Аномально высокие концентрации ПО наблюдались в 2020 году в мае-июне в период полного локдауна. Майский максимум 2020 года составил 142 ppb (рис. 1). В течение 2020 года был зафиксирован 81 день, когда концентрация ПО была выше 50 ppb, из них 15 дней ЭВКО ($\text{МСК8-О}_3 \geq 86$ ppb), тогда как в 2019 году было только два дня с МСК8-О_3 выше ПДК. В 2021 году с мая по август наблюдался весенне-летний максимум приземного озона (рис. 1), было зафиксировано 73 дня с превышением российского норматива качества воздуха, в том числе 10 дней ЭВКО, когда $\text{МСК8-О}_3 \geq 86$ ppb (табл. 3).

Согласно значениям коэффициента корреляции Спирмена, связь между МСК8-О_3 с концентрациями предиктов и метеорологическими параметрами была низкой во все сезоны (табл. 4).

Для лучшего понимания изменений концентрации ПО необходимо иметь в виду следующее. В общем случае концентрация ПО складывается из нескольких составляющих: (1) поступающего из нижней стратосферы и верхних слоев тропосферы в результате СВ озона, что, скорее всего, определяет некоторый фоновый уровень, фатальный и независимый от региональных источников предиктов; (2) фотохимически образующегося озона, с

максимумом в июне и в полуденное время; (3) озона, поступающего с НУМСТ с разных высот тропосферы. При этом каждый тип озона может переноситься горизонтально на разных высотах и увеличивать концентрацию ПО в изучаемой геолокации.

Фотохимически генерируемый озон может образовываться в двух режимах (ЛОС-ограниченный и NO_x -ограниченный), для характеристики которых мы использовали наземные измерения при расчете FNR. Для сравнения фотохимических механизмов образования озона были построены зависимости концентраций озона от полученных с помощью наземных измерений значений FNR. Зависимости плохо описываются регрессионной зависимостью, наиболее подходящей оказалась кубическая регрессия с самым высоким значением R^2 в 2020 году, равным (0,212) (табл. 5, рис. 3).

Согласно данным ДЗЗ [29] для городской территории Челябинска, мы можем с высокой надежностью использовать следующие характеристики режимов: $\text{FNR} < 1$ представляет собой ЛОС-ограниченный режим, а $\text{FNR} > 1,8$ представляет собой ограничение по NO_x . Переходный режим характеризуется интервалом значений $1 < \text{FNR} < 1,8$ (ЛОС- NO_x -ограниченный) режим, где на образование ПО влияют как выбросы ЛОС, так и выбросы NO_x [29]. Наземные данные (рис. 3) показывают существенно более высокие значения FNR, до 200 единиц в 2020 г., однако зависимости концентрации озона от значения FNR не наблюдается. Высокие значения FNR регистрируются как в дни с концентрацией ПО выше 50 ppb, так и в дни с низкими значениями ПО. Свободный член в уравнении регрессии может косвенно соответствовать среднему фоновому уровню ПО, независимого от фотохимических превращений. Он был самым высоким в 2021 г. и составил 40,9 ppb (табл. 3). Таким образом, значения FNR, полученные с помощью

методов наземного мониторинга, дают мало информации для прогнозирования концентрации ПО. Это вполне логично и обусловлено тем, что фотохимические превращения происходят на значительно большей высоте,

чем 2 м над поверхностью, оксиды азота и формальдегид могут рассеиваться и не фиксироваться наземными датчиками. Рассеивание загрязняющих веществ зависит от многих факторов, которые необходимо учитывать.

Таблица 3. Сравнительные характеристики 2019–2021 гг.

Table 3. Comparative characteristics of 2019–2021

Год Year	Среднее годовое значение ПО*, млрд ⁻¹ Average annual O ₃ *, ppb	МСК8-О ₃ , млрд ⁻¹ /MDA8-O ₃ , ppb mean±SD** min...max	Количество дней с концентрацией ПО Days with O ₃		Уравнение регрессии*** Regression equation***				Среднее годовое значение Be, мБк·м ⁻³ mBq m ⁻³ Average±SD
			МСК8-О ₃ ≥ 50 ppb	МСК8-О ₃ ≥ 86 ppb	a	b	c	const****	
2019	20	$\frac{15 \pm 11}{2 \dots 55}$	2	0	-0,643	0,054	-0,001	16,3	1,6±0,2
2020	70	$\frac{44 \pm 33}{3 \dots 142}$	81	15	1,887	-0,025	8,90E-05	21,3	3,0±0,3
2021	28	$\frac{43 \pm 24}{2 \dots 104}$	73	10	0,309	0,083	-0,002	40,9	3,9±0,4

Примечание: * Усредненное значение концентрации озона, рассчитанное по всем измерениям озона на посту мониторинга в течение года; **SD – стандартное отклонение; ***O₃= aFNR+bFNR²+cFNR³+const; ****Фоновая концентрация ПО

Note: * Average of all ozone concentrations measured during the year; ** SD – standard deviation;

O₃= aFNR+bFNR²+cFNR³+const; * background O₃

Таблица 4. Коэффициенты корреляции Спирмена между концентрацией МСК8-О₃ и среднесуточными концентрациями предикторов, а также метеопараметрами в различные сезоны за период с 2019 по 2021 год

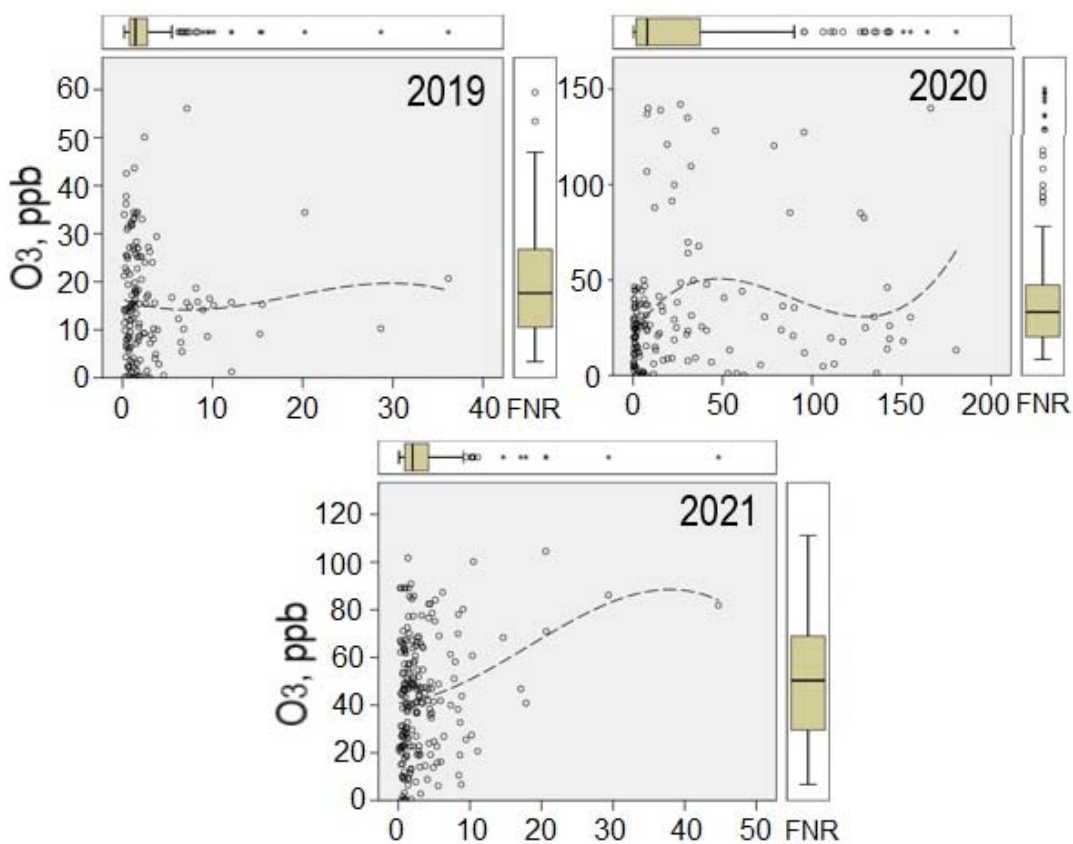
Table 4. Spearman-Rank correlation coefficient values of MDA8-O₃ with predictors and meteorological parameters 2019–2021

Параметр Parameter	Коэффициенты корреляции Спирмена Spearman correlation coefficients			
	Весна / Spring	Лето / Summer	Осень / Autumn	Зима / Winter
NO, млрд ⁻¹ (ppb)	-0,085	-0,094*	-0,101*	-0,111*
NO ₂ , млрд ⁻¹ (ppb)	-0,098*	-0,189**	-0,131*	-0,092*
НСНО, млрд ⁻¹ (ppb)	-0,104*	-0,112*	-0,067*	-0,079
FNR (=НСНО/NO _x) (наземный мониторинг) FNR (=НСНО/NO _x) (ground monitoring)	0,231**	0,178**	0,196**	0,256**
T, °C	0,274**	0,301**	0,187**	0,198**
RH, %	-0,201**	-0,201**	-0,201**	-0,201**
SR, Вт/м ² (W/m ²)	0,167**	0,171**	0,159**	0,164**
UVD	0,132**	0,154**	0,137**	0,141**
UVI	0,134**	0,156**	0,138**	0,139**
WS, м/с (m/s)	0,184**	0,194**	0,181**	0,175**
WDIR	0,059	0,035	0,046	0,051

Примечание / Note: *p<0,05; **p<0,01

Таблица 5. Значения R^2 , рассчитанные для регрессионных моделей зависимости МСК8-О₃ от наземно-измеренных FNR**Table 5.** R^2 calculated for regression models MDA8-O₃ depends from ground-based FNR

Модель Model	R^2		
	2019	2020	2021
Линейная / Linear	0,001	0,050	0,052
Логарифмическая / Logarithmic	0,010	0,163	0,038
Обратная / Inverse	0,030	0,101	0,018
Квадратичная / Quadratic	0,020	0,098	0,053
Кубическая / Cubic	0,050	0,212	0,055
Показательная / Compound	0,003	0,037	0,026
Степенная / Power	0,002	0,083	0,037
S-кривая / S-curve	0,002	0,031	0,017
Растущая / Growth	0,002	0,037	0,026
Экспоненциальная / Exponential	0,002	0,037	0,026
Логистическая / Logistic	0,002	0,037	0,026

**Рисунок 3.** Зависимости МСК8-О₃ от значений наземно-измеренных FNR в 2019–2021**Figure 3.** Dependencies of MDA8-O₃ on ground-measured FNR in 2019–2021

Для прогнозирования концентраций ПО необходимо учитывать, помимо фотохимии, приток стратосферного воздуха в тропосферу. События переноса из стратосферы в тропосферу могут быть связаны с накоплением озона в складках тропопаузы средних широт. При этом часть воздуха остается в складке и возвращается в нижнюю стратосферу, но растяжение СВ до еще более мелких масштабов может привести к необратимому переносу глубже в нижние слои тропосферы или даже на поверхность Земли. Для количественной оценки влияния стратосферного вторжения на концентрацию ПО в качестве трассера может быть применен ^7Be . Согласно данным о концентрации ^7Be в аэрозолях стратосферно-тропосферные переносы увеличиваются весной,

достигая максимума в мае-июле в зависимости от года (рис. 4). В целом весенне-летнее увеличение переноса озона хорошо согласуется с литературными данными для Северного полушария. Учитывая, что объемная доля приземного воздуха, которая могла быть перенесена из стратосферы, обычно составляет от 2–3 % (до максимальных 5 %), можно ввести коэффициент K %, который соответствует стратосферному переносу, и варьируется от 2 % до 5 %.

Было принято, что стратосферное значение для ^7Be , равное $100 \text{ МБк} \cdot \text{м}^{-3}$, находится в диапазоне уровней ^7Be в нижней стратосфере [36]. Для озона мы предположили значение в нижней стратосфере 250 ppb на основе среднегодового значения озона на высотах между 200 и 250 гПа [36]. Предполагая $K=5\%$, для среднего

значения ПО около 50 ppb, ожидается рост концентрации на 10 ppb, что соответствует увеличению ^7Be на $5 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-3}$. В среднем, каждое увеличение ^7Be на $1 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-3}$

соответствует вторжению озона, увеличивающему поверхностную концентрацию на 2,5 ppb [36].

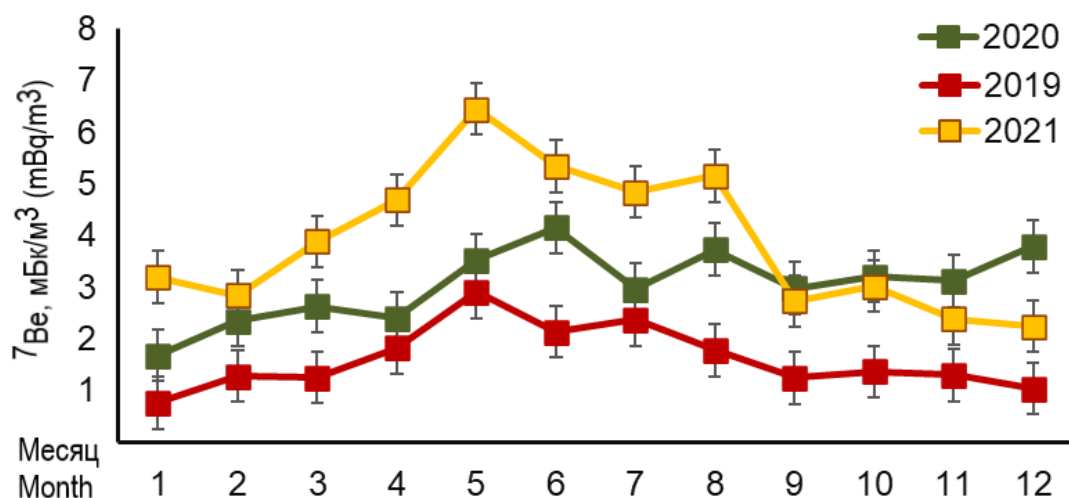


Рисунок 4. Изменение концентрации ^7Be в атмосферных аэрозолях в течение 2019–2021 гг.

Figure 4. Change of ^7Be concentration in atmospheric aerosols during 2019–2021

Из табл. 3 и рис. 4 следует, что фоновое значение ПО за трехлетний период 2019–2021 гг. изменялось пропорционально изменению концентрации ^7Be в аэрозолях и с большой долей вероятности стратосферные вторжения вносят вклад в концентрацию ПО в Челябинске от 4 до 9,8 ppb.

В дополнение к глубоким струйным течениям, которые приводят к СВ озона, увеличению концентрации ПО могут способствовать НУМСТ. Мезо- и мелкомасштабные потоки могут вызывать сложную вертикальную слоистую структуру атмосферы [37], частота возникновения их увеличивается в ночной период весной и летом. Гипотеза горизонтального переноса озона в ночной период из пригорода была опровергнута путем анализа нескольких эпизодов на восьми, расположенных в разных частях города постах государственного мониторинга (данные не приведены этой статье, так как публикация столь детальных результатов мониторинга с указанием координат постов и фактических измерений по всему городу может угрожать обеспечению государственной безопасности). Выбранный пост мониторинга, находится в центре города, если бы наблюдались горизонтальные переносы, то на постах, расположенных ближе к окраинам города концентрация озона в течение ночи росла в первую очередь, постепенно уменьшаясь к центру. Такого не наблюдалось. Также не нашла своего подтверждения первичная гипотеза о том, что эпизоды ночных повышений озона связаны с синоптическими ситуациями (гребень циклона, например), приводящими к вертикальному переносу озона, накопленного в тропосферных складках. Логично заключить, что в этом случае ночное повышение озона наблюдалось бы редко и на всех постах одновременно. В проанализированных эпизодах ночные превышения ПО наблюдались только на выборочных постах, всегда в разных районах и в разный временной интервал, при этом частота событий составляла до трети ночей в году. Таким образом, мы пришли к выводу, что в условиях стабильного ночного пограничного слоя, при отсутствии известных источников загрязнения ПО и в отсутствие фотохимических процессов, НПСО могут быть объяснены только

низкоуровневым вертикальным перемешиванием и переносом озона из верхних слоев на поверхность путем НУМСТ. За исследуемый период было зафиксировано 86, 158 и 174 эпизодов НПСО в 2019, 2020 и 2021 годах, соответственно (рис. 5; табл. 5).

В январе число дней с НПСО, как правило, незначительно, оно начинает увеличиваться в феврале, достигая высоких значений в марте-мае, в это же время увеличивается концентрация озона, что обусловлено процессами вертикального переноса за счет образования НУМСТ. В это время фотохимические процессы также ускоряются, но не вносят большого вклада в формирование весеннего максимума озона.

В период летнего фотохимического загрязнения интенсивная солнечная радиация и высокая температура окружающего воздуха днем приводят к образованию больших количеств O_3 . Фотохимический озон, синтезированный днем, может накапливаться в пределах конвективного пограничного слоя. После захода Солнца ночью формируется приповерхностный устойчивый пограничный слой, а в верхней части пограничного слоя атмосферы формируется остаточный слой, в котором еще сохраняются высокие концентрации озона. Между 21:00 и 06:00 концентрация озона в остаточном слое уменьшается из-за горизонтального и вертикального переноса, увеличивая концентрацию озона у поверхности [38]. Кроме того, следует отметить, что крупномасштабная урбанизация в регионе изменяет локальные циркуляции с ее чрезмерным тепловым потоком и повышенной шероховатостью поверхности [39]. Городской остров тепла, создаваемый тепловым контрастом между городским центром и прилегающей территорией, создает конвергентный поток в городской центр. В Челябинске крупные металлургические заводы оказывают значительное влияние на формирование городского острова тепла. Модельные расчеты показали [40], что высокие температуры в промышленных районах соответствуют области дивергенции поверхности, создающей нисходящее вертикальное движение воздуха и влияющей на концентрации загрязняющих веществ в воздухе. Таким образом, фотосинтезированный озон в

ночной период не только не разрушается полностью, но и может переноситься на некоторые расстояния, в том числе из промышленных районов, где концентрации предиктов

озона высоки, в центр города, а формирование НУМСТ способствует повышению концентрации озона в ночное время в центре города на изучаемом посту мониторинга.

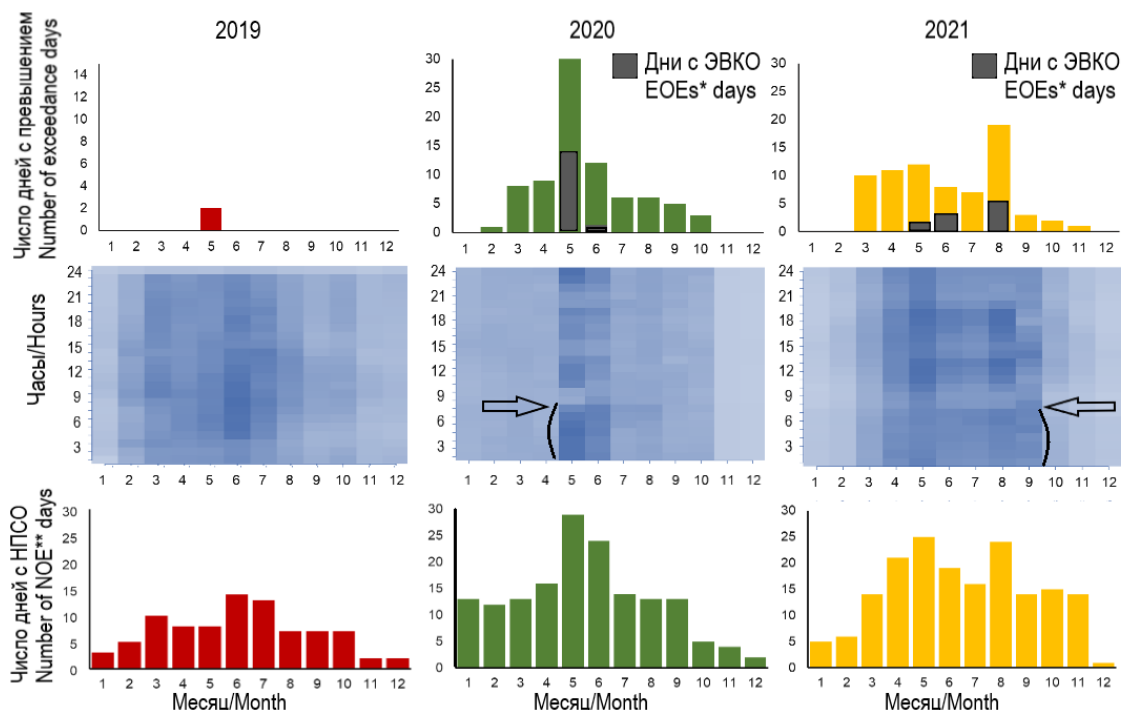


Рисунок 5. Ежемесячные события НПСО в 2019–2021 гг.

Figure 5. Monthly events of nighttime ozone increases in 2019–2021

Таблица 5. Количество дней с НПСО в 2019–2021 гг.

Table 5. Number of days with nighttime increases in ozone levels in 2019–2021

Месяц Month	2019	2020	2021
1	3	13	5
2	5	12	6
3	10	13	14
4	8	16	21
5	8	29	25
6	14	24	19
7	13	14	16
8	7	13	24
9	7	13	14
10	7	5	15
11	2	4	14
12	2	2	1
Итого / Total	86	158	174

Именно совокупностью фотохимических процессов образования озона и наличием НУМСТ обусловлено anomальное повышение концентрации ПО в мае 2020 года. Рассмотрим этот эпизод более подробно. Май стал месяцем полного карантина COVID-19 в Челябинске. Концентрация оксидов азота в приземном воздухе снизилась до значений, близких к нулю (рис. 1), из-за снижения как выбросов производства, так и автотранспорта. В период с 5 по 10 мая погоду на Урале формировал мощный высотный антициклон, центр которого длительное время располагался над северным Казахстаном, наблюдалась аномально жаркая погода, когда воздух прогревался днем до 25–27 градусов. С 12 мая циркуляция атмосферы изменилась, и Южный Урал оказался на юго-восточной периферии высотного циклона. С 25 мая Челябинская область вновь оказалась в высотном

хребте, по-летнему жаркая погода наблюдалась 24–25 и 28–31 мая, днем воздух прогревался до 28–35 градусов. В течение месяца наблюдалось 30 дней с температурными инверсиями, общей продолжительностью 269 часов. Высокие температуры способствовали активным фотохимическим процессам образования ПО, инверсии препятствовали рассеиванию предиктов и образовавшегося О₃. На рис. 5 видно, что для мая 2020 года характерны выраженные НПСО, что косвенно согласно принятой нами методологии свидетельствует о формировании НУМСТ в ночное время и накоплению озона в приземном слое. Из-за карантина COVID-19 объем антропогенных выбросов NO_x снизился, образовавшийся озон не снижался за счет оттитрования оксидами азота, что способствовало формированию режима красной опасности (табл. 2). В это время население Челябинска

было значительно инфицировано COVID-19, а это значит, что практически все население находилось в зоне риска по озону, так как чувствительность к нему, очевидно, возросла из-за инфекции. Это могло способствовать тому, что Челябинск попал в список городов России с самой высокой избыточной смертностью в 2020 году – 1581 человек на 100 000 населения, заняв 11-е место в списке из 83 регионов по данным [41]. В первой декаде июня 2020 года также наблюдался период антициклона с высокими температурами. Самая высокая максимальная температура была зафиксирована 11 июня (плюс 33°C). В течение июня 2020 года было 12 дней с концентрацией ПО, превышающей 50 ppb и один день ЭВКО. Интересно, что в июле 2020 года также наблюдалась высокая температура и мощная волна тепла продолжительностью 13 дней. Среднемесячная температура воздуха в Челябинске составила плюс 22,7 °С, что на 3,8° выше нормы. Самыми жаркими были конец первой и вся вторая декада месяца, 10–11, 13–19 июля днем воздух прогревался до 35–37 °С. Однако среднемесячная концентрация озона была ниже, чем в июне, и было всего 6 дней с концентрацией ПО, превышающей 50 ppb. В целом, хотя июль обычно является самым жарким месяцем в году, и было бы логично, что на него

приходится наибольшее производство фотохимического озона, но в 2019–2022 годах июль не стал месяцем летнего максимума ПО. Интенсивность солнечного света наиболее высока в период летнего солнцестояния (21 июня), но пик температуры наступает позже из-за тепловой инерции. Поскольку образование озона зависит от УФ-излучения, в июне могут быть более благоприятные фотохимические условия, несмотря на жаркий июль. Биогенные ЛОС также влияют на ПО. Деревья выделяют изопрен и терпены (природные ЛОС), которые способствуют образованию ПО. В европейских регионах пиковые биогенные выбросы происходят в июне или начале лета, когда растительность наиболее активна, а не в самую жаркую часть лета. К июлю стресс от засухи или снижение активности растений могут снизить выделение ЛОС [42].

Наши исследования показали, что случаи НПСО способствуют более высоким концентрациям озона на следующий день (рис. 6). Ночное повышение озона приводит к увеличению окислительной способности атмосферы и стимулирует образованию радикалов NO_3 , что, в свою очередь, влияет на образование и распределение вторичных загрязняющих веществ на следующий день [43].

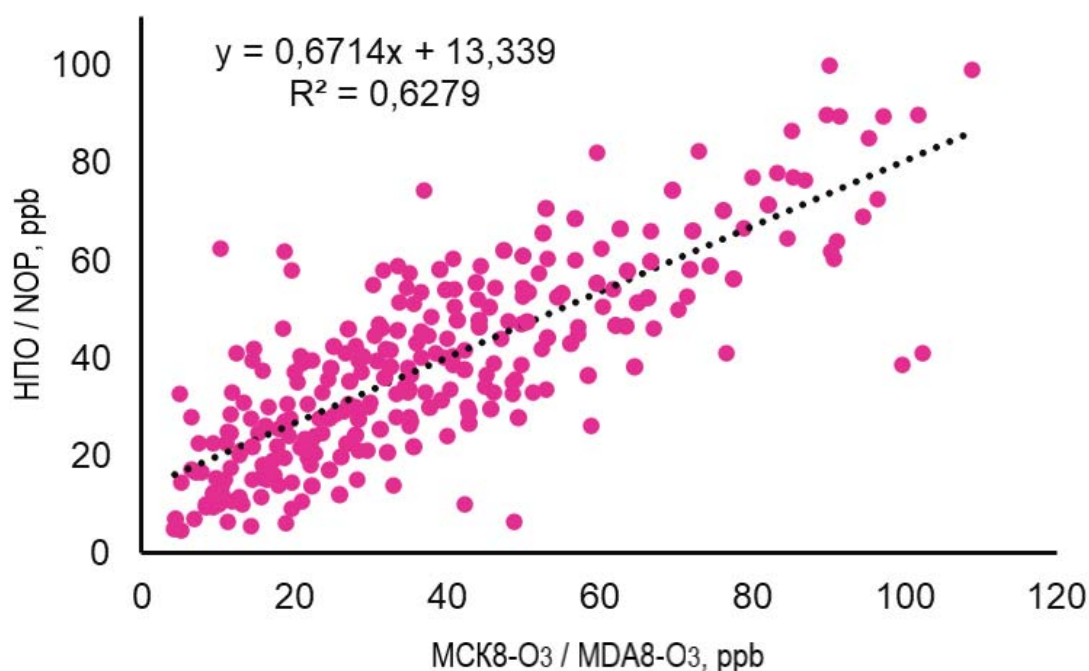


Рисунок 6. Соотношение между величинами НПО и MCK8-O₃ на следующий день

Figure 6. The relationship between NOP value and MDA8-O₃ during following days

Основываясь на предыдущих исследованиях [43], мы использовали 40 ppb в качестве порогового значения. В течение исследуемого периода 2019–2021 гг. было в общей сложности 205 дней событий НПСО, когда значения НПО превышали этот порог, что составляет 49 % от общего числа событий НПСО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были изучены закономерности изменения концентраций приземного озона в масштабе промышленного российского города в течение 2019–2021 гг. Было показано, что основными источниками озона являются: (1) стратосферные вторжения, определяющие фоновое содержание озона от 4 до 9,8 ppb; (2) фотохимический

синтез с максимумом в июне; (3) низкоуровневые переносы, являющиеся также причиной частого (до трети суток в году) ночного повышения концентрации озона. Соотношение концентраций формальдегида и оксидов азота, измеренных на станциях мониторинга качества воздуха (наземные измерения), не является надежным параметром для определения режима образования озона.

По-видимому, на существование низкоуровневых горизонтальных переносов озона оказывает значительное влияние локальный остров тепла, сформированный над крупным металлургическим предприятием в промышленной зоне города. Разности температур между центральной частью города и промышленной зоной способствуют конвективным переносам озона.

Мониторинг содержания приземного озона в период локдауна показал, что при снижении выбросов оксидов азота на территории промышленного города могут создаваться условия для накопления экстремально высоких концентраций озона. К таким условиям относятся блокирующий антициклон, температурные инверсии, длительные волны тепла, при которых в условиях насыщения воздуха биогенными ЛОС происходит синтез озона в высоких концентрациях, а при низких концентрациях оксидов азота он не успевает оттитровываться. Таким образом, хотя в период локдауна концентрация оксидов азота была низкой, создались условия накопления озона до красного уровня опасности, когда у представителей уязвимых групп населения могли возникнуть серьезные последствия для здоровья.

Существует значительная взаимосвязь между ночными пиковыми концентрациями озона и его повышенным содержанием на следующий день. Это может быть важным при формировании целевых стратегий снижения содержания приземного озона в воздухе промышленного города. Учитывая изменчивость и сложность процессов, влияющих на концентрацию приземного озона, будущие исследования должны быть сосредоточены на выявлении многомасштабных движущих факторов и использовании современных моделей искусственного интеллекта для повышения точности прогнозирования качества атмосферного воздуха. Такие усилия будут в значительной степени способствовать более эффективному управлению приземным озоном в городах, улучшению здоровья граждан и продвижению устойчивого глобального экологического развития.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-20017 и при финансовой поддержке Правительства Челябинской области. Авторы хотели бы поблагодарить Екатерину Выходцеву за помощь в интерпретации синоптической ситуации. Мы благодарим сотрудников лаборатории Челябинского центра гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды за анализ бериллия-7. Наземные наблюдения и метеорологические данные предоставлены Челябинским центром гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды (<http://chelpogoda.ru>).

ACKNOWLEDGMENTS

This project was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-27-20017 and by the financial support of the Government of Chelyabinsk Region.

The authors would like to thank Ekaterina Vykhotseva for her help in interpreting the synoptic situation. We thank the laboratory of Chelyabinsk Centre for Hydrometeorology and Environmental Monitoring staff for analysis of beryllium-7. The ground-based observations and meteorological data were provided by the Chelyabinsk Centre for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (<http://chelpogoda.ru>).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization. 2021.
2. Ni J., Jin J., Wang Y., Li B., Wu Q., Chen Y., Du S., Li Y., He C. Surface ozone in global cities: A synthesis of basic features, exposure risk, and leading meteorological driving factors // *Geography and Sustainability*. 2024. V. 5. N 3. P. 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2023.09.008>

3. Khalil M.A.K. Steady states and transport processes in urban ozone balances // *Npj Climate and Atmospheric Science*. 2018. V. 1. N 22. <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0035-7>
4. Fried A., Cantrell C., Olson J. et al. Detailed comparisons of airborne formaldehyde measurements with box models during the 2006 INTEX-B and MILAGRO campaigns: potential evidence for significant impacts of unmeasured and multi-generation volatile organic carbon compounds // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2011. V. 11. N 22. P. 11867–11894. <https://doi.org/10.5194/acp-11-11867-2011>
5. Schroeder J.R. et al. Formaldehyde column density measurements as a suitable pathway to estimate near-surface ozone tendencies from space // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2016. V. 121. P. 13088–13112. <https://doi.org/10.1002/2016JD025419>
6. Wang D., Pu D., De Smedt I. et al. Evolution of global O₃-NO_x-VOCs sensitivity before and after the COVID-19 from the ratio of formaldehyde to NO₂ from satellite observations // *Journal of Environmental Sciences*. 2025. V. 156. P. 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.07.029>
7. Wang W., Van der A.R., Ding J., Van Weele M., Cheng T. Spatial and temporal changes of the ozone sensitivity in China based on satellite and ground-based observations // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2021. V. 21. P. 7253–7269. <https://doi.org/10.5194/acp-21-7253-2021>
8. Colombi N.K., Jacob D.J., Yang L.H. et al. Why is ozone in South Korea and the Seoul metropolitan area so high and increasing? // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2023. V. 23. P. 4031–4044. <https://doi.org/10.5194/acp-23-4031-2023>
9. Chen Z., Liu J., Qie X. et al. Stratospheric influence on surface ozone pollution in China // *Nature Communications*. 2024. V. 15. Article ID: 4064. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48406-x>
10. Chang F., Li J., Li N., Liao H. Stratospheric intrusion may aggravate widespread ozone pollution through both vertical and horizontal advections in eastern China during summer // *Frontiers in Environmental Science*. 2023. V. 10. Article ID: 1115746. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1115746>
11. Bonasoni P., Evangelisti F., Bonafe U. et al. Stratospheric ozone intrusion episodes recorded at Mt. Cimone during the VOTALP project: case studies // *Atmospheric Environment*. 2000. V. 34. N 9. P. 1355–1365. [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(99\)00280-0](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(99)00280-0)
12. Gaffney J.S., Marley N.A., Cunningham M.M., Kotamarthi V.R. Beryllium-7 measurements in the Houston and Phoenix urban areas: an estimation of upper atmospheric ozone contributions // *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2005. V. 55. N 8. P. 1228–1235. <https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464707>
13. Chang L., Xu J., Tie X. et al. The impact of Climate Change on the Western Pacific Subtropical High and the related ozone pollution in Shanghai, China // *Scientific Reports*. 2019. V. 9. Article ID: 16998. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53103-7>
14. Massagué J., Torre-Pascual E., Carnerero C. et al. Extreme ozone episodes in a major Mediterranean urban area // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2024. V. 24. P. 4827–4850. <https://doi.org/10.5194/acp-24-4827-2024>
15. Romero-Alvarez J., Lupaşcu A., Lowe D., Badia A. et al. Sources of surface O₃ in the UK: tagging O₃ within WRF-Chem // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022. V. 22. P. 13797–13815. <https://doi.org/10.5194/acp-22-13797-2022>
16. Alduwais A.K., Dasari H.P., Gandham H. et al. Extreme surface ozone episodes over the Arabian Gulf and their relationship with meteorological conditions // *Atmospheric Environment*. 2025. V. 352. Article ID: 121213. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2025.121213>
17. Lin X., Yuan Z., Yang L., Luo H., Li W. Impact of Extreme Meteorological Events on Ozone in the Pearl River Delta, China // *Aerosol and Air Quality Research*. 2019. V. 19. P. 1307–1324. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.01.0027>
18. Vienne M., Dore A.J., Stevenson D.S. et al. Modelling surface ozone during the 2003 heat-wave in the UK // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2010. V. 10. P. 7963–7978. <https://doi.org/10.5194/acp-10-7963-2010>
19. Yang X., Zeng G., Iyakaremye V., Zhu B. Effects of different types of heat wave days on ozone pollution over Beijing-Tianjin-Hebei and its future projection // *Science of the Total Environment*. 2022. V. 837. Article ID: 155762. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155762>
20. Kuznetsova I., Elanskii N.F., Shalygina I.Yu., Kadyrov E., Lykov A.D. Temperature inversions and their influence on surface ozone concentration in the vicinity of the town of Kislovodsk // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2002. P. 27–35.
21. Shariepour Z., Aliakbari Bidokhti A.A. Investigation of surface ozone over Tehran for 2008–2011 // *Journal of the Earth and Space Physics*. 2013. V. 39. N 3. P. 191–206. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2013.35607>
22. An C., Li H., Ji Y. et al. A review on nocturnal surface ozone enhancement: Characterization, formation causes, and atmospheric chemical effects // *Science of The Total Environment*. 2024. V. 921. Article ID: 170731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170731>

23. Agathokleous E., Feng Z., Sicard H. Surge in nocturnal ozone pollution // *Science*. 2023. V. 382. N 6675. Article ID: 1131. <https://doi.org/10.1126/science.adm7628>
24. Rohit S., Kamna S., Anu R.S. Variations of surface ozone levels in urban area of India: a focus on night-time residual concentrations // *Journal of Environmental Quality*. 2021. V. 42. P. 22–35. <https://doi.org/10.6092/issn.2281-4485/10809>
25. Li X., Ren J., Huang R. et al. The aggravation of summertime nocturnal ozone pollution in China and its potential impact on the trend of nitrate aerosols // *Geophysical Research Letters*. 2023. V. 50. Article ID: e2023GL103242. <https://doi.org/10.1029/2023gl103242>
26. He C., Lu X., Wang H. et al. The unexpected high frequency of nocturnal surface ozone enhancement events over China: characteristics and mechanisms // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022. V. 22. P. 15243–15261. <https://doi.org/10.5194/acp-22-15243-2022>
27. Krupnova T.G., Rakova O.V., Simakhina V.I., Vykhodtseva E.A., Kochegorov V.M. Surface ozone in the industrial city of Chelyabinsk, Russia // *Geography, environment, sustainability*. 2024. V. 17. N 4. P. 223–234. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2024-3364>
28. Donzelli G., Cioni L., Cancellieri M., Llopis-Morales A., Morales-Suárez-Varela M. Air Quality during Covid-19 Lockdown // *Encyclopedia*. 2021. V. 1. N 3. P. 519–526. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia1030043>
29. Крупнова Т.Г., Ракова О.В., Стручкова Г.П., Капитонова Т.А., Тихонова С.А., Выходцева Е.А., Кочегоров В.М. Обнаружение возможности оценки режимов образования приземного озона на основе данных дистанционного зондирования Земли // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2025. Т. 22. N 5. С. 385–397. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-5-385-397>
30. Fontes T., Silva L.M., Silva M.P., Barros N., Carvalho A.C. Can artificial neural networks be used to predict the origin of ozone episodes? // *Science of the Total Environment*. 2014. V. 488–489. P. 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.04.077>
31. Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н., Ганьшин Е.В. и др. Современный опыт использования данных наземных микроволновых радиометрических систем для измерения параметров атмосферы // *Оптика атмосферы и океана*. 2017. Т. 30. N 06. С. 502–508. <https://doi.org/10.15372/AOO20170609>
32. Fang C., Zhou X., Cai Y., Wang J. Characterization and atmospheric drivers of nocturnal ozone enhancement in Putian City, China // *Atmosphere*. 2025. V. 16. N 45. <https://doi.org/10.3390/atmos16010045>
33. United States Environmental Protection Agency. Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI). NC, 2024. 32 p.
34. Monks P.S. A review of the observations and origins of the spring ozone maximum // *Atmospheric Environment*. 2000. V. 34. N 21. P. 3545–3561. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00129-1](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00129-1)
35. Shutter J.D., Cox J.L., Keutsch F.N. Leaf-Level bidirectional exchange of formaldehyde on deciduous and evergreen tree saplings // *ACS Earth and Space Chemistry*. 2024. V. 18. N 8. P. 723–733. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.3c00325>
36. Gerasopoulos E., Zanis P., Papastefanou C. et al. A complex case study of down to the surface intrusions of persistent stratospheric air over the Eastern Mediterranean // *Atmospheric Environment*. 2006. V. 40. N 22. P. 4113–4125. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.03.022>
37. Couillard M.H., Schwab M.J., Schwab J.J. et al. Vertical profiles of ozone concentrations in the lower troposphere downwind of New York City during LISTOS 2018-2019 // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2021. V. 126. Article ID: e2021JD035108. <https://doi.org/10.1029/2021JD035108>
38. Pan R., Zhang K., Chen D., Huang L., Wang Y., Li H., Li L. Investigation into the nocturnal ozone in a typical industrial city in North China Plain, China // *Environmental Pollution*. 2024. V. 360. Article ID: 124627. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124627>
39. Yang H., Lu C., Hu Y., Chan P.-W., Li L., Zhang L. Effects of horizontal transport and vertical mixing on nocturnal ozone pollution in the Pearl River delta // *Atmosphere*. 2022. V. 13. N 8. Article ID: 1318. <https://doi.org/10.3390/atmos13081318>
40. Luo H., Lu C. Impacts of local circulations on ozone pollution in the New York metropolitan area: Evidence from three summers of observations // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2024. V. 129. Article ID: e2023JD039206. <https://doi.org/10.1029/2023JD039206>
41. Timonin S., Klimkin I., Shkolnikov V.M., Andreev E., McKee M., Leon D.A. Excess mortality in Russia and its regions compared to high income countries: An analysis of monthly series of 2020 // *SSM Population Health*. 2021. V. 17. Article ID: 101006. <https://doi.org/10.1016/j.ssmph.2021.101006>
42. Trimmel H., Hamer P.D., Mayer M. et al. The influence of vegetation drought stress on formaldehyde and ozone distributions over a central European city // *Atmospheric Environment*. 2023. V. 304. Article ID: 119768. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119768>
43. Zhu L., Han X., Xu L.R. et al. Nocturnal ozone enhancement in Shandong Province, China, in 2020-2022: spatiotemporal distribution and formation mechanisms // *Science of the Total Environment*. 2024. V. 925. Article ID: 171542. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.171542>

REFERENCES

1. WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva, World Health Organization, 2021.
2. Ni J., Jin J., Wang Y., Li B., Wu Q., Chen Y., Du S., Li Y., He C. Surface ozone in global cities: A synthesis of basic features, exposure risk, and leading meteorological driving factors *Geography and Sustainability*, 2024, vol. 5, no. 3, pp. 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2023.09.008>
3. Khalil M.A.K. Steady states and transport processes in urban ozone balances. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 2018, vol. 1, no. 22. <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0035-7>
4. Fried A., Cantrell C., Olson J. et al. Detailed comparisons of airborne formaldehyde measurements with box models during the 2006 INTEx-B and MILAGRO campaigns: potential evidence for significant impacts of unmeasured and multi-generation volatile organic carbon compounds. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, vol. 11, no. 22, pp. 11867–11894. <https://doi.org/10.5194/acp-11-11867-2011>
5. Schroeder J.R. et al. Formaldehyde column density measurements as a suitable pathway to estimate near-surface ozone tendencies from space. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, vol. 121, pp. 13088–13112. <https://doi.org/10.1002/2016JD025419>
6. Wang D., Pu D., De Smedt I. et al. Evolution of global O₃-NO_x-VOCs sensitivity before and after the COVID-19 from the ratio of formaldehyde to NO₂ from satellite observations. *Journal of Environmental Sciences*, 2025, vol. 156, pp. 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.07.029>
7. Wang W., Van der A R., Ding J., Van Weele M., Cheng T. Spatial and temporal changes of the ozone sensitivity in China based on satellite and ground-based observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, vol. 21, pp. 7253–7269. <https://doi.org/10.5194/acp-21-7253-2021>
8. Colomby N.K., Jacob D.J., Yang L.H. et al. Why is ozone in South Korea and the Seoul metropolitan area so high and increasing? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2023, vol. 23, pp. 4031–4044. <https://doi.org/10.5194/acp-23-4031-2023>
9. Chen Z., Liu J., Qie X. et al. Stratospheric influence on surface ozone pollution in China. *Nature Communications*, 2024, vol. 15, article id: 4064. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48406-x>
10. Chang F., Li J., Li N., Liao H. Stratospheric intrusion may aggravate widespread ozone pollution through both vertical and horizontal advections in eastern China during summer. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, vol. 10, article id: 1115746. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1115746>
11. Bonasoni P., Evangelisti F., Bonafe U. et al. Stratospheric ozone intrusion episodes recorded at Mt. Cimone during the VOTALP project: case studies. *Atmospheric Environment*, 2000, vol. 34, no. 9, pp. 1355–1365. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00280-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00280-0)
12. Gaffney J.S., Marley N.A., Cunningham M.M., Kotamarthi V.R. Beryllium-7 measurements in the Houston and Phoenix urban areas: an estimation of upper atmospheric ozone contributions. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2005, vol. 55, no. 8, pp. 1228–1235. <https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464707>
13. Chang L., Xu J., Tie X. et al. The impact of Climate Change on the Western Pacific Subtropical High and the related ozone pollution in Shanghai, China. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, article id: 16998. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53103-7>
14. Massagué J., Torre-Pascual E., Carnerero C. et al. Extreme ozone episodes in a major Mediterranean urban area. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2024, vol. 24, pp. 4827–4850. <https://doi.org/10.5194/acp-24-4827-2024>
15. Romero-Alvarez J., Lupaşcu A., Lowe D., Badia A. et al. Sources of surface O₃ in the UK: tagging O₃ within WRF-Chem. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, vol. 22, pp. 13797–13815. <https://doi.org/10.5194/acp-22-13797-2022>
16. Alduwais A.K., Dasari H.P., Gandham H. et al. Extreme surface ozone episodes over the Arabian Gulf and their relationship with meteorological conditions. *Atmospheric Environment*, 2025, vol. 352, article id: 121213. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2025.121213>
17. Lin X., Yuan Z., Yang L., Luo H., Li W. Impact of Extreme Meteorological Events on Ozone in the Pearl River Delta, China. *Aerosol and Air Quality Research*, 2019, vol. 19, pp. 1307–1324. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.01.0027>
18. Vieno M., Dore A.J., Stevenson D.S. et al. Modelling surface ozone during the 2003 heat-wave in the UK. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, vol. 10, pp. 7963–7978. <https://doi.org/10.5194/acp-10-7963-2010>
19. Yang X., Zeng G., Iyakaremye V., Zhu B. Effects of different types of heat wave days on ozone pollution over Beijing-Tianjin-Hebei and its future

- projection. *Science of the Total Environment*, 2022, vol. 837, article id: 155762. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155762>
20. Kuznetsova I., Elanskii N.F., Shalygina I.Yu., Kadyrov E., Lykov A.D. Temperature inversions and their influence on surface ozone concentration in the vicinity of the town of Kislovodsk. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2002, pp. 27–35.
21. Shariipour Z., Aliakbari Bidokhti A.A. Investigation of surface ozone over Tehran for 2008–2011. *Journal of the Earth and Space Physics*, 2013, vol. 39, no. 3, pp. 191–206. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2013.35607>
22. An C., Li H., Ji Y. et al. A review on nocturnal surface ozone enhancement: Characterization, formation causes, and atmospheric chemical effects. *Science of The Total Environment*, 2024, vol. 921, article id: 170731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170731>
23. Agathokleous E., Feng Z., Sicard H. Surge in nocturnal ozone pollution. *Science*, 2023, vol. 382, no. 6675, article id: 1131. <https://doi.org/10.1126/science.adm7628>
24. Rohit S., Kamna S., Anu R.S. Variations of surface ozone levels in urban area of India: a focus on night-time residual concentrations. *Journal of Environmental Quality*, 2021, vol. 42, pp. 22–35. <https://doi.org/10.6092/issn.2281-4485/10809>
25. Li X., Ren J., Huang R. et al. The aggravation of summertime nocturnal ozone pollution in China and its potential impact on the trend of nitrate aerosols. *Geophysical Research Letters*, 2023, vol. 50, article id: e2023GL103242. <https://doi.org/10.1029/2023gl103242>
26. He C., Lu X., Wang H. et al. The unexpected high frequency of nocturnal surface ozone enhancement events over China: characteristics and mechanisms. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, vol. 22, pp. 15243–15261. <https://doi.org/10.5194/acp-22-15243-2022>
27. Krupnova T.G., Rakova O.V., Simakhina V.I., Vykhotseva E.A., Kochegorov V.M. Surface ozone in the industrial city of Chelyabinsk, Russia. *Geography, environment, sustainability*, 2024, vol. 17, no. 4, pp. 223–234. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2024-3364>
28. Donzelli G., Cioni L., Cancellieri M., Llopis-Morales A., Morales-Suárez-Varela M. Air Quality during Covid-19 Lockdown. *Encyclopedia*, 2021, vol. 1, no. 3, pp. 519–526. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia1030043>
29. Krupnova T.G., Rakova O.V., Struchkova G.P., Kapitonova T.A., Tikhonova S.A. Vykhotseva E.A., Kochegorov V.M. Discovery of the possibility of assessing surface ozone formation regimes based on Earth remote sensing data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, vol. 22, no. 5, pp. 385–397. (In Russian) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-5-385-397>
30. Fontes T., Silva L.M., Silva M.P., Barros N., Carvalho A.C. Can artificial neural networks be used to predict the origin of ozone episodes? *Science of the Total Environment*, 2014, vol. 488–489, pp. 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.04.077>
31. Kadyrov E.N., Kuznetsova I.N., Ganshin E.V. et al. Modern experience of using ground-based microwave radiometric systems for the study of atmospheric parameters. *Optika Atmosfery i Okeana*, 2017, vol. 30, no. 06, pp. 502–508. (In Russian) <https://doi.org/10.15372/AOO20170609>
32. Fang C., Zhou X., Cai Y., Wang J. Characterization and atmospheric drivers of nocturnal ozone enhancement in Putian City, China. *Atmosphere*, 2025, vol. 16, no. 45. <https://doi.org/10.3390/atmos16010045>
33. United States Environmental Protection Agency. Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI). NC, 2024, 32 p.
34. Monks P.S. A review of the observations and origins of the spring ozone maximum. *Atmospheric Environment*, 2000, vol. 34, no. 21, pp. 3545–3561. [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(00\)00129-1](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(00)00129-1)
35. Shutter J.D., Cox J.L., Keutsch F.N. Leaf-Level bidirectional exchange of formaldehyde on deciduous and evergreen tree saplings. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2024, vol. 18, no. 8, pp. 723–733. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.3c00325>
36. Gerasopoulos E., Zanis P., Papastefanou C. et al. A complex case study of down to the surface intrusions of persistent stratospheric air over the Eastern Mediterranean. *Atmospheric Environment*, 2006, vol. 40, no. 22, pp. 4113–4125. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.03.022>
37. Couillard M.H., Schwab M.J., Schwab J.J. et al. Vertical profiles of ozone concentrations in the lower troposphere downwind of New York City during LISTOS 2018–2019. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, vol. 126, article id: e2021JD035108. <https://doi.org/10.1029/2021JD035108>
38. Pan R., Zhang K., Chen D., Huang L., Wang Y., Li H., Li L. Investigation into the nocturnal ozone in a typical industrial city in North China Plain, China. *Environmental Pollution*, 2024, vol. 360, article id: 124627. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124627>
39. Yang H., Lu C., Hu Y., Chan P.-W., Li L., Zhang L. Effects of horizontal transport and vertical mixing on nocturnal ozone pollution in the Pearl River delta. *Atmosphere*, 2022, vol. 13, no. 8, article id: 1318. <https://doi.org/10.3390/atmos13081318>
40. Luo H., Lu C. Impacts of local circulations on ozone pollution in the New York metropolitan area: Evidence from three summers of observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2024, vol. 129, article id: e2023JD039206. <https://doi.org/10.1029/2023JD039206>
41. Timonin S., Klimkin I., Shkolnikov V.M., Andreev E., McKee M., Leon D.A. Excess mortality in Russia and its regions compared to high income countries: An analysis of monthly series of 2020. *SSM Population Health*, 2021, vol. 17, article id: 101006. <https://doi.org/10.1016/j.ssmph.2021.101006>
42. Trimmel H., Hamer P.D., Mayer M. et al. The influence of vegetation drought stress on formaldehyde and ozone distributions over a central European city. *Atmospheric Environment*, 2023, vol. 304, article id: 119768. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119768>
43. Zhu L., Han X., Xu L.R. et al. Nocturnal ozone enhancement in Shandong Province, China, in 2020–2022: spatiotemporal distribution and formation mechanisms. *Science of the Total Environment*, 2024, vol. 925, article id: 171542. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.171542>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Татьяна Г. Крупнова написала первоначальный черновик статьи, провела визуализацию, валидацию, методологическую работу, исследование, формальный анализ и концептуализацию. Ольга В. Ракова отрецензировала и отредактировала статью, занималась валидацией, исследованием и концептуализацией. Валерий М. Кочегоров отрецензировал и отредактировал статью, участвовал в концептуализации. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Tatyana G. Krupnova undertook writing of original draft, visualisation, validation, methodology, investigation, formal analysis and conceptualisation. Olga V. Rakova writing undertook review and editing, validation, investigation and conceptualisation. Valeriy M. Kochegorov undertook writing, review and editing and conceptualization. All authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Татьяна Г. Крупнова / Tatyana G. Krupnova <https://orcid.org/0000-0003-0862-710X>

Ольга В. Ракова / Olga V. Rakova <https://orcid.org/0000-0002-5788-5933>

Валерий М. Кочегоров / Valeriy M. Kochegorov <https://orcid.org/0009-0003-5238-099X>