

УДК 504.3.054
DOI 10.52575/2712-7443-2026-50-1-0-9
EDN PJS LDM

Изучение взаимосвязи между концентрациями приземного озона и оксидов азота в воздухе города Челябинска

¹Ракова О.В., ¹Крупнова Т.Г., ²Стручкова Г.П., ³Кочегоров В.М.,
³Выходцева Е.А., ²Капитонова Т.А., ²Тихонова С.А.

¹Южно-Уральский государственный университет,
Россия, 454080, г. Челябинск, Ленина, 76

²Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН,
Россия, 677980, г. Якутск, Октябрьская, 1

³Челябинский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды –
филиал ФГБУ «Уральское УГМС»,
Россия, 454080, г. Челябинск, Витебская, 15

rakovaov@susu.ru, krupnovatg@susu.ru, pandoramy8@list.ru, kvm@chelpogoda.ru,
omp@chelpogoda.ru, kapitonova@iptpn.ysn.ru, sardankobeleva@gmail.com

Аннотация. Целью работы является выявление закономерностей изменения концентраций приземного озона и оксидов азота как его прекурсоров в крупном российском промышленном городе Челябинске. Исследования проводились путем анализа суточных данных со стационарных станций государственной сети наблюдений за условиями окружающей среды сети Росгидромет. С помощью метеорологического температурного профилемера были изучены инверсии, получены характеристики инверсионного слоя в условиях крупного промышленного города. Показано, как инверсии и особенности микроклимата в местах расположения станций влияют на загрязнение атмосферного воздуха в Челябинске. С использованием технологий дистанционного зондирования Земли изучен тепловой остров города. Анализ изображения *Landsat 8* показал, что максимальная температура поверхности Земли на территории города в зонах промышленных площадок и крупных транспортных узлов аномально повышается. При изучении суточного хода приземного озона наблюдался аномальный максимум в ночное время в условиях формирования инверсий.

Ключевые слова: приземный озон, оксид азота (IV), оксид азота (II), инверсия, тепловой остров

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-20017 и при финансовой поддержке Правительства Челябинской области, https://rscf.ru/prjcard_int?24-27-20017

Для цитирования: Ракова О.В., Крупнова Т.Г., Стручкова Г.П., Кочегоров В.М., Выходцева Е.А., Капитонова Т.А., Тихонова С.А. 2026. Изучение взаимосвязи между концентрациями приземного озона и оксидов азота в воздухе города Челябинска. Региональные геосистемы, 50(1): 105–117. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-1-0-9 EDN: PJS LDM

Study of the Relationship between Surface Ozone and Nitrogen Oxides Concentrations in the Air of Chelyabinsk

¹Olga V. Rakova, ¹Tatyana G. Krupnova, ²Galina P. Struchkova, ³Valeriy M. Kochegorov,
³Ekaterina A. Vykhodtseva, ²Tamara A. Kapitonova, ²Sardana A. Tikhonova

¹South Ural State University,

76 Lenin St., Chelyabinsk, 454080, Russia

²V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, SB RAS

1 Oktyabrskaya St., Yakutsk, 677980, Russia

³Chelyabinsk Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring,

Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet)

15 Vitebskaya St., Chelyabinsk, 454080, Russia

rakovaov@susu.ru, krupnovatg@susu.ru, pandoramy8@list.ru, kvm@chelpogoda.ru,

omp@chelpogoda.ru, kapitonova@iptpn.ysn.ru, sardankobeleva@gmail.com

Abstract. The aim of the work is to identify patterns of changes in surface ozone and nitrogen oxide concentrations as its predictors in the large Russian industrial city of Chelyabinsk. The studies were conducted by analyzing daily data from stationary stations of the state network of environmental observations of the Roshydromet. Using a meteorological temperature profiler, we studied inversions and obtained characteristics of the inversion layer in the conditions of a large industrial city. It is shown how inversions and microclimate features at the locations of stations affect air pollution in Chelyabinsk. Using remote sensing technologies, the heat island of the city was studied. The analysis of Landsat 8 images revealed an anomalous increase in the maximum surface temperature of the Earth in the city in the areas of industrial sites and large transport hubs. When studying the diurnal variation of surface ozone, an anomalous maximum was observed at night under conditions of inversion formation.

Keywords: surface ozone, nitrogen oxide (IV), nitrogen oxide (II), inversion, heat island

Acknowledgements: This study was supported by grant from the Russian Science Foundation, project No. 24-27-20017, with a financial support from the Chelyabinsk region, https://rscf.ru/prjcard_int?24-27-20017

For citation: Rakova O.V., Krupnova T.G., Struchkova G.P., Kochegorov V.M., Vykhodtseva E.A., Kapitonova T.A., Tikhonova S.A. 2026. Study of the Relationship between Surface Ozone and Nitrogen Oxides Concentrations in the Air of Chelyabinsk. Regional Geosystems, 50(1): 105–117 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-1-0-9 EDN: PJSLDM

Введение

Приземный озон является опасным загрязнителем атмосферного воздуха. Его присутствие необходимо в стратосфере, но нежелательно в тропосфере, поскольку озон может легко вступать в реакцию со многими соединениями, образуя при этом высоко токсичные кислородсодержащие органические вещества. Эволюция озона в нижней тропосфере сильно зависит от климатических изменений, синоптической ситуации, биогенных и химических процессов. Варьирования концентраций приземного озона в свою очередь могут изменять климат как в региональном, так и в глобальном масштабе. Актуальность исследования определяется опасностью этого газа для здоровья населения. Во всем мире приземный озон является причиной нескольких сотен тысяч преждевременных смертей и десятков миллионов посещений отделений неотложной помощи [Zhang et al., 2019; Mousavinezhad et al., 2023; Donzelli, Suarez-Varela, 2024]. Воздействие озона на человека происходит главным образом при вдыхании, он может вызывать астму [Zhang et al., 2019], также сообщается о кожных реакциях [Salonen et al.,

2018]. Показано, что с повышенными концентрациями озона связано увеличение на 25 % случаев рака кожи и меланомы [Марочко и др., 2011].

Озон естественным образом присутствует в стратосфере и играет жизненно важную роль в защите от ультрафиолетового излучения Солнца. В тропосфере же он классифицируется как вторичный загрязнитель, поскольку не выбрасывается напрямую, а образуется в результате химических реакций из прекурсоров [Andreev et al., 2022; Dewan, Lakhani, 2022].

Отличительной особенностью микроклимата урбанизированных территорий является значительное превышение температуры воздуха над городом по сравнению с пригородными районами и формирование городского острова тепла. В ряде работ [Stathopoulou et al., 2008; Lai, Cheng, 2009] исследовалась связь между наличием городского острова тепла и качеством атмосферного воздуха. Было обнаружено, что система стабильного высокого давления, устанавливающаяся во время антициклона, способствует как образованию городского острова тепла, так и увеличению содержания приземного озона. Изучение связи загрязнения атмосферного воздуха с метеоусловиями, наличием, характеристиками инверсионного слоя и островом тепла необходимо не только для улучшения понимания физико-химических явлений, но также для разработки и оценки стратегий улучшения качества городского воздуха. Целью настоящей работы было изучение закономерностей изменения концентрации приземного озона в атмосферном воздухе типичного российского индустриального города Челябинска. Была изучена связь между концентрациями озона и оксидов азота как его прекурсоров. Также было показано влияние инверсий и острова тепла города на концентрацию приземного озона.

Объекты и методы исследования

Для исследования были использованы данные с государственной сети мониторинга загрязнений атмосферного воздуха Федеральной службы Росгидромет. Существующие в городе Челябинске посты мониторинга можно отнести к различным типам весьма условно. Дело в том, что отличительной чертой российских индустриальных городов является невозможность деления города на классические типы зон – жилые кварталы, индустриальные территории, коммерческие территории. Промышленные предприятия могут быть расположены в центре города. Так в Челябинске, практически в центре города находятся электрометаллургический комбинат и крупнейший в мире и единственный в России завод по производству высококачественного цинка и цинковых сплавов. Более подробная характеристика постов мониторинга была дана в предыдущих исследованиях [Krupnova et al., 2020]. Условно можно сказать, что имеются два фоновых поста, где влияние прямых выбросов минимально. Остальные посты Росгидромета в городе Челябинске находятся в зоне влияния транспортных и промышленных выбросов.

Для анализа использовались данные с сервера Росгидромета за 2022 год. Благодаря установленным автоматическим газоанализаторам на постах, мониторинг таких загрязняющих веществ как тропосферный озон, оксиды азота, проводится непрерывно каждые 20 минут, что составляет 72 измерения в сутки. Для получения профилей температуры и оценки влияния города на пограничный слой атмосферы был использован метеорологический вертикальный профилемер температуры *MTP-5*. В качестве исходного материала данных ДЗЗ использовали безоблачные снимки *Landsat 8 OLI*, обработанные с использованием программного обеспечения *ENVI 5.2*, в результате была получена теплокарта, отражающая значения коэффициента излучения поверхности (КИП).

Для Челябинска характерны весенние и летние максимумы в годовом ходе приземного озона. Но, в феврале 2022 года установился блокирующий антициклон и сформировались устойчивые инверсии. Нами был детально проанализирован эпизод повышенных концентраций загрязнителей в атмосферном воздухе Челябинска в этот период.

Результаты и их обсуждение

Характерной особенностью годового хода концентраций приземного озона является то, что они начинают увеличиваться уже в марте (рис. 1), достигая максимума в июне. Имеются литературные данные [Симакина, Крюкова, 2020; Andreev et al., 2021; 2022] о весенних максимумах по крайней мере еще на семи станциях в РФ. Что касается Челябинска, то сезонные концентрации озона (см. рис. 1) в фоновой городской точке хорошо согласуются с сезонной динамикой солнечной радиации, определяющей летний максимум.

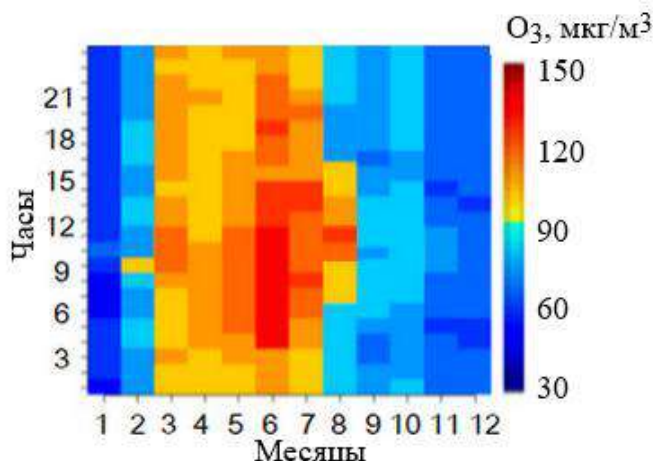


Рис. 1. Годовой и суточный ход концентрации приземного озона в течение 2022 года на городской фоновой станции

Fig. 1. Annual and daily variation of surface O_3 during 2022 at the urban background station

Также наблюдается локальный весенний максимум, который как было показано в нашей предыдущей работе [Krupnova et al., 2024], связан с климатическими особенностями и возможностью переноса озона из верхних слоев тропосферы струйными течениями. Некоторое смещение летнего сезонного максимума в сторону весенних месяцев может быть связано с высотой пограничного слоя. В недавней работе [Pichelli et al., 2014] было показано, что высота пограничного слоя атмосферы зимой и в начале весны значительно ниже, что приводит к концентрированию вредных веществ в меньшем объеме атмосферы и препятствует их разбавлению. Кроме того, оксиды азота (NO и NO_2) играют важную роль в глобальном загрязнении воздуха, являясь важнейшими прекурсорами тропосферного озона [Berezina et al., 2020; Moiseenko et al., 2021; Thorp et al., 2021; Nguyen et al., 2022; Di Bernardino et al., 2023]. Их сезонные колебания представлены на рис. 2, соответственно.

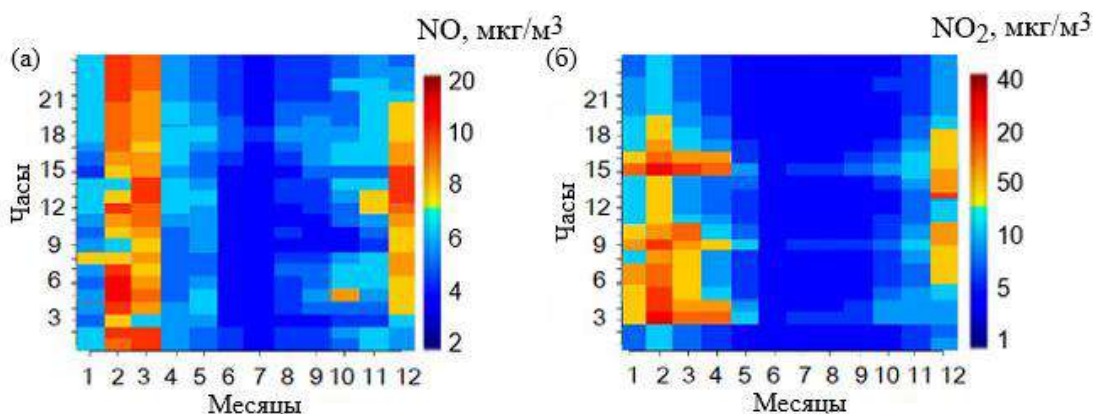


Рис. 2. Годовой и суточный ход концентрации NO (а) и NO_2 (б) в течение 2022 года на фоновой станции

Fig. 2. Annual and daily variation of NO (a) and NO_2 (б) during 2022 at the urban background station

Как видно из рис. 2, концентрация оксидов азота значительно выше зимой, что объясняется несколькими факторами. Во-первых, зимой на количество оксидов азота влияет увеличение антропогенных выбросов, связанных с проведением отопительного сезона. Дополнительно к этому, высота пограничного слоя атмосферы, как было уже сказано, ниже зимой, что усугубляет накопление оксидов азота вблизи поверхности земли [Pichelli et al., 2014; Di Bernardino et al., 2023]. Наконец, условия постоянной стабильности атмосферы и возможное наличие температурного инверсионного слоя уменьшают вертикальное перемешивание, препятствуя рассеиванию загрязнителей [Virolainen et al., 2023]. На концентрацию оксидов азота в большей степени может влиять формирование приподнятых инверсий в условиях антициклона (рис. 3).

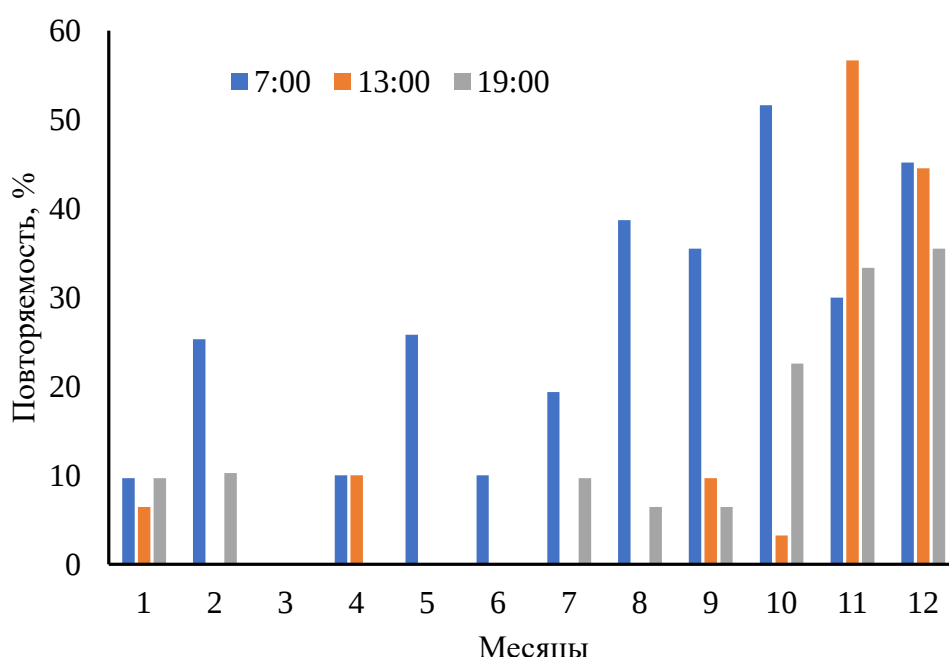


Рис. 3. Повторяемость приподнятых инверсий по месяцам в течение 2022 года в утреннее, дневное и вечернее время

Fig. 3. The recurrence of elevated inversions by month during 2022 in the morning, afternoon, and evening

Повышенные концентрации оксидов азота могут быть обусловлены тепловым островом города, который затрудняет рассеивание загрязнений [Смертин, Насырова, 2023]. Тепловой остров города в зимнее время был изучен с использованием технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В качестве исходного материала данных ДЗЗ использовали мультиспектральные снимки *Landsat 8 OLI*, полученные в условиях отсутствия облаков. На рис. 4 можно видеть четкие очертания территории города на фоне естественно низкой температуры поверхности Земли за пределами городской территории. Заметно влияние рельефа местности – на водных объектах и небольших низинах вокруг города зафиксирована температура земной поверхности до 24...26 условных единиц КИП (коэффициент излучения поверхности). При этом на территории города можно выделить две зоны наибольших тепловых аномалий, первая – в промышленной зоне металлургического комбината, вторая – центр города. В центре города основной вклад вносят транспортные выхлопы, которые выделяют большое количество тепла.

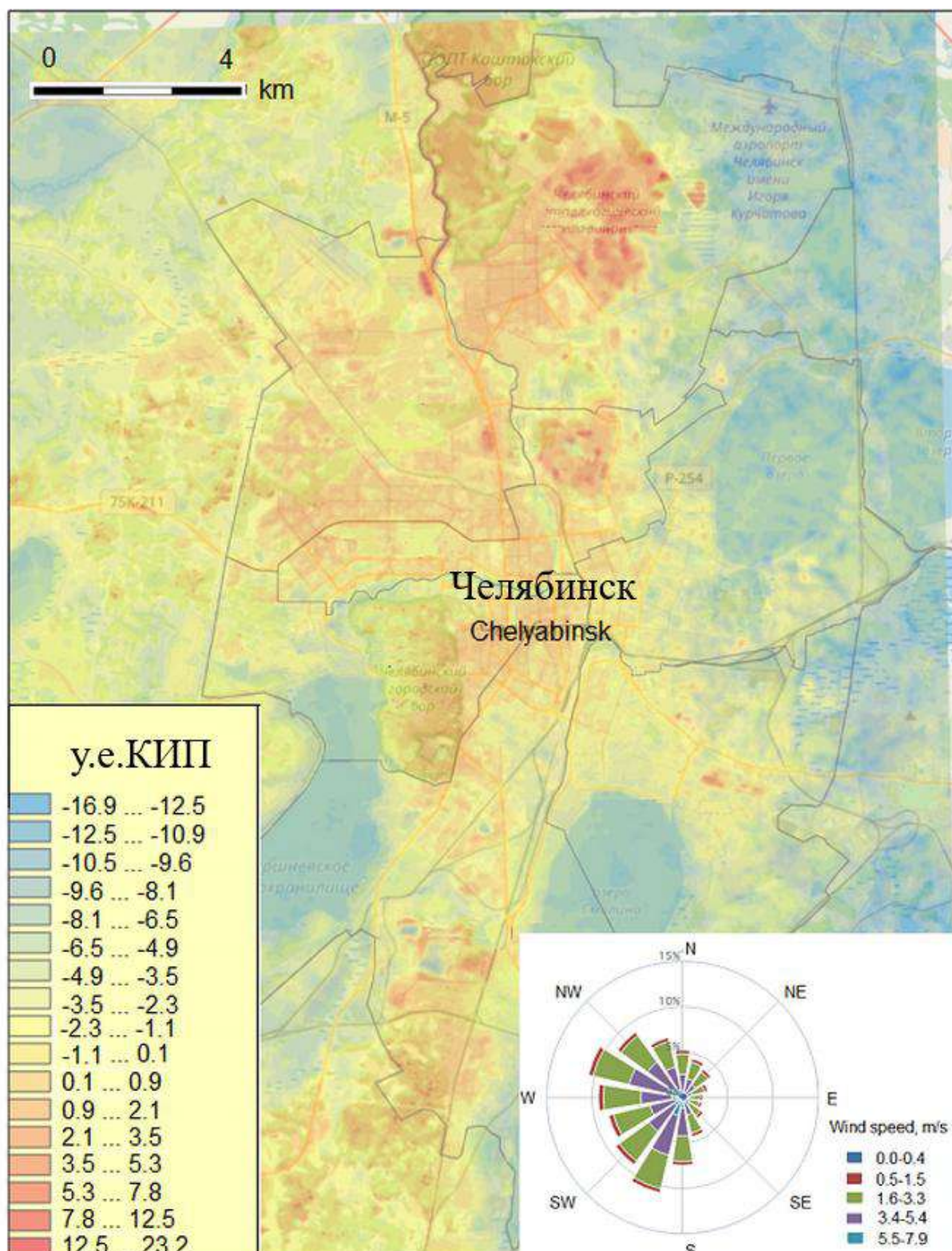


Рис. 4. Теплокарта, характерная для февраля 2022 г.
Fig. 4. Land surface temperature map for February 2022

В 2022 году в феврале были зафиксированы необычно высокие концентрации загрязняющих веществ, над городом прочно повис смог. Нами был детально проанализирован этот эпизод повышенных концентраций загрязнителей в атмосферном воздухе Челябинска в период формирования устойчивых инверсий на фоне антициклона в течение четырех дней в феврале (рис. 5).



Рис. 5. Фотография, иллюстрирующая формирование инверсионного слоя над Челябинском в феврале 2022 г.

Fig. 5. Picture of inversion layer above Chelyabinsk in February 2022

1 февраля наблюдались утренние и вечерне-ночные инверсии с максимумом мощности 300–400 м. В течение 2 и 3 февраля наблюдалась мощная продолжительная инверсия с 00 до 12 часов и с 16 до 24 часов по местному времени. Во время инверсии более холодный приземный воздух не может подняться вверх, и происходит накопление загрязнения у поверхности земли. Температурные инверсии, как правило, разрушаются с наступлением утра под действием солнечного света, но 2 и 3 февраля разрушение инверсии происходило лишь к полудню, а к 16 часам она формировалась вновь (рис. 6). 4 февраля мощность инверсии снизилась, и фотохимический смог над городом начал разрушаться.

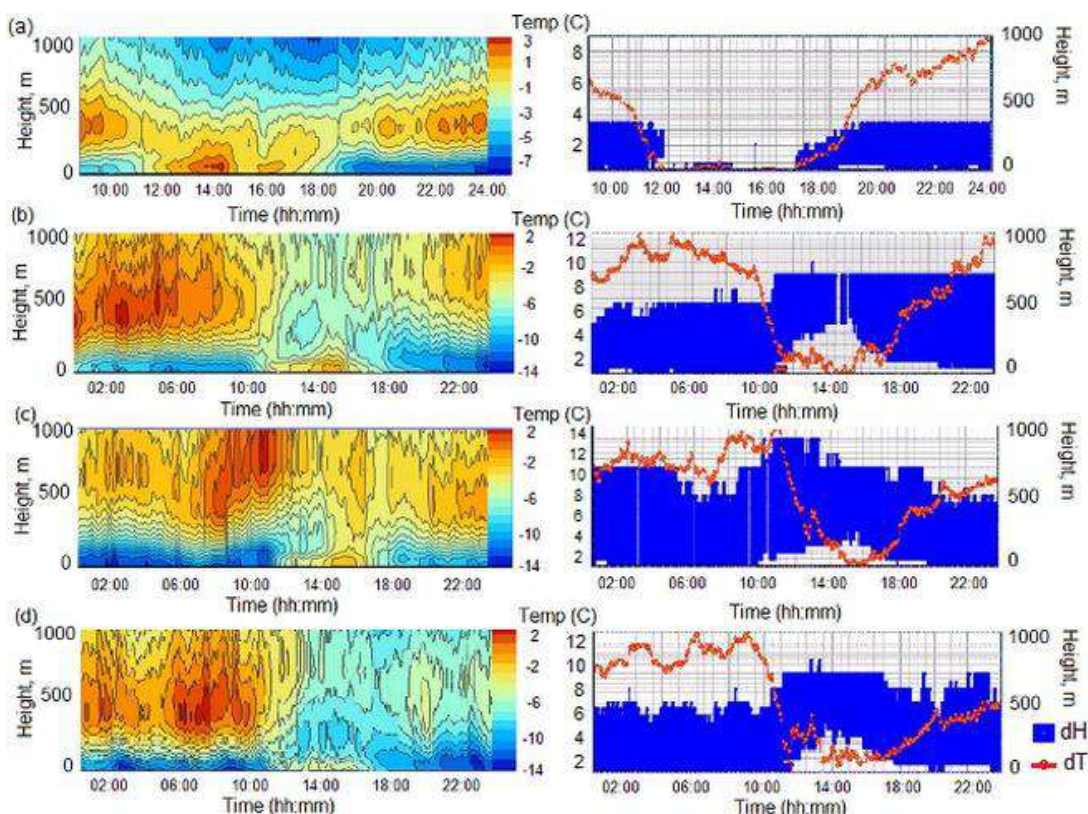


Рис. 6. Суточные вариации температурной инверсии 1–4 февраля

Fig. 6. Temperature profiles for the period from (a) February 1 to (d) February 4

Во время эпизода НМУ (неблагоприятных метеоусловий) 1–4 февраля наблюдались высокие концентрации диоксида азота как на постах, находящихся в зоне влияния оживленных транспортных магистралей и промышленных предприятий, так и на фоновом посту (рис. 7–9).

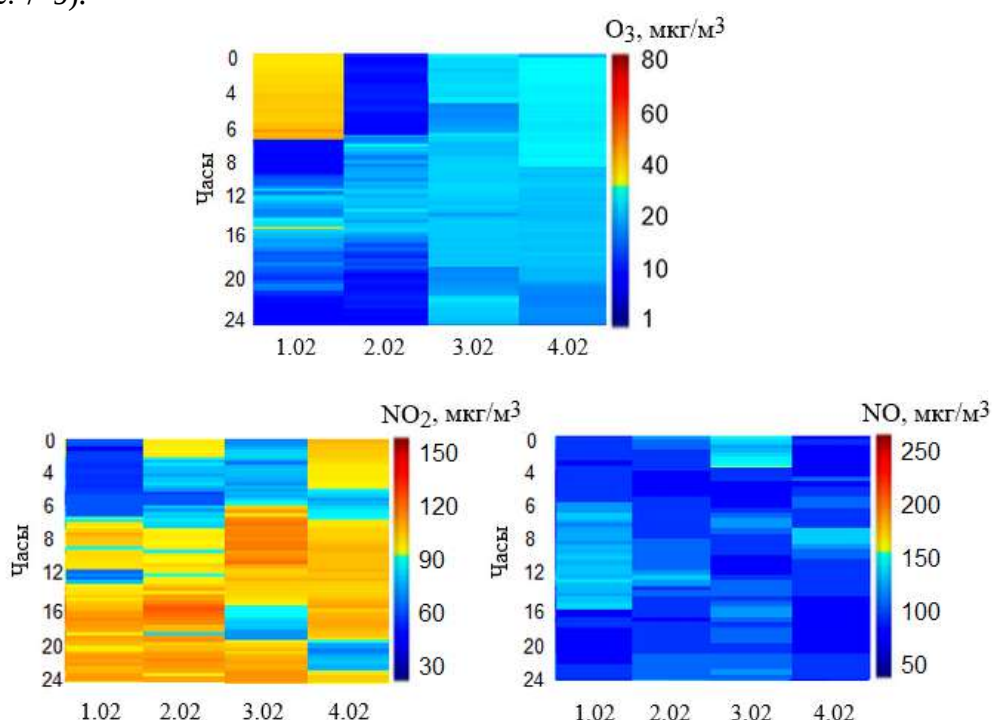


Рис. 7. Суточные изменения концентраций O_3 , NO_2 and NO на посту, расположенном в зоне влияния транспорта
Fig. 7. O_3 , NO_2 and NO concentration changes at the transport station during the day

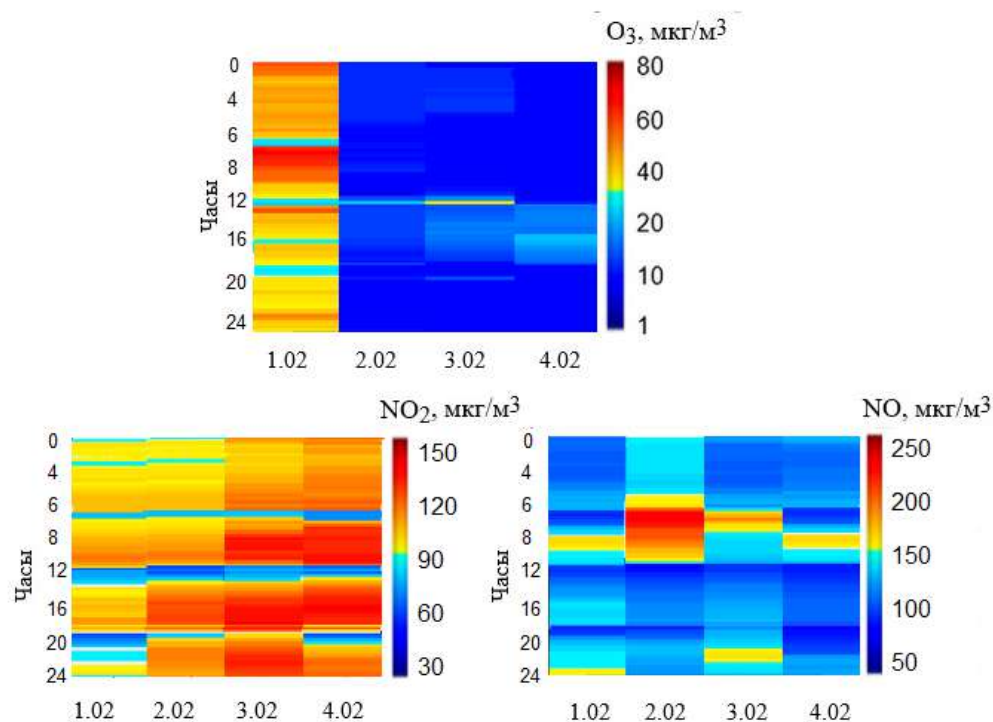


Рис. 8. Суточные изменения концентраций O_3 , NO_2 and NO на посту, расположенном в зоне влияния металлургического комбината
Fig. 8. O_3 , NO_2 and NO concentration changes at the industrial station during the day

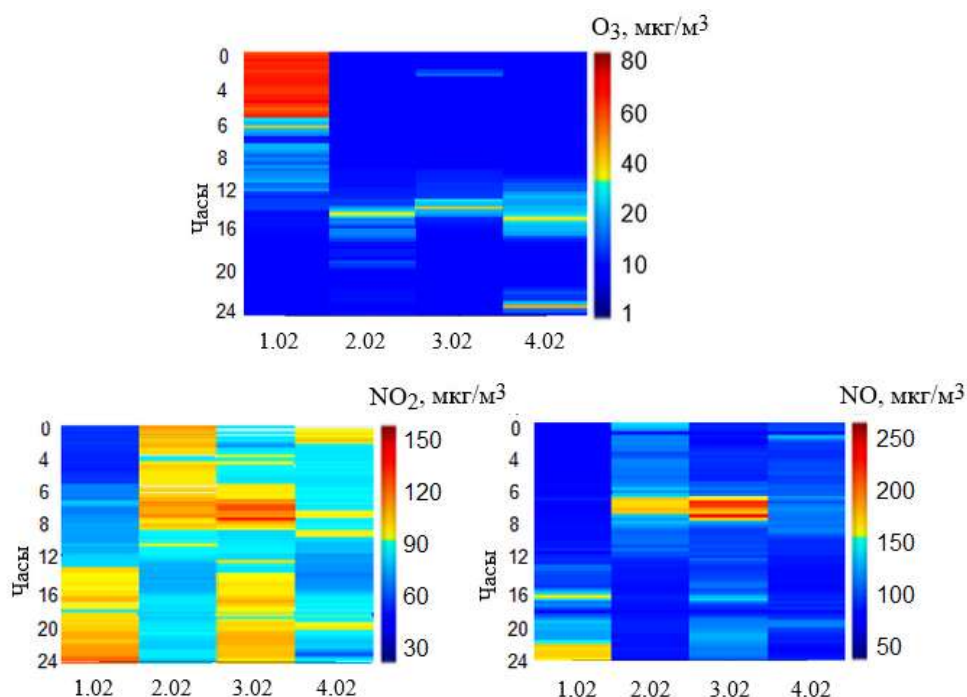


Рис. 9 Суточные изменения концентраций O_3 , NO_2 and NO на городском фоновом посту
Fig. 9. O_3 , NO_2 and NO concentration changes at the urban background station during the day

При этом 1 февраля превышение ПДК (предельно допустимой концентрации) среднесуточных по диоксиду азота было зафиксировано лишь на посту, находящемся в зоне влияния Челябинского металлургического комбината (рис. 8), а в последующие дни и на остальных постах. То есть, несмотря на принятые меры по снижению выбросов предприятий 2–4 февраля в воздухе происходило накопление оксидов азота, так как из-за формирования инверсионного слоя, рассеивание загрязнений было затруднено.

На рис. 6 можно заметить, что с 12 до 16 часов по местному времени происходило временное разрушение инверсий, поэтому в будущем, в подобных случаях, можно порекомендовать смещение части выбросов промышленных предприятий на центральные часы дня, когда создаются более благоприятные для рассеивания выбросов условия. Это позволит значительно снизить пиковые и в меньшей степени среднесуточные значения без изменения общего количества выбрасываемых загрязняющих веществ. Выгоды могут быть также достигнуты за счет более оптимального перераспределения выбросов в течение всего суточного цикла.

При анализе эпизодов также было выявлено наличие ночных максимумов концентраций приземного озона (ночные концентрации превышают дневные или сравнимы с ними). Так, в ночные часы первого февраля наблюдались аномальные ночные концентрации озона в условиях низких концентраций оксидов азота, затем происходило накопление оксидов азота из-за снижения рассеивания в условиях инверсий и весь тропосферный озон расходовался на взаимодействие с оксидами азота. Ночной максимум озона связан с особенностями генерации озона внутри пограничного слоя [Andreev et al., 2022], она наибольшая во внутреннем слое перемешивания (на высоте порядка 1 км) вместо привычного у поверхности земли. Данные за февраль не случайны. Именно в этот период подстилающая поверхность начинает освобождаться от снежного покрова, что благоприятствует увеличению количества оксидов азота, поступающих в атмосферу. Одновременно идет увеличение притока солнечной радиации. Все это способствует генерации озона в слое перемешивания. В ночное время, когда существенно уменьшается турбулентное перемешивание, происходит оседание озона, образовавшегося во внутреннем слое перемешивания, к поверхности Земли.

Заключение

Мы изучили изменения сезонных концентраций приземного озона и оксидов азота в качестве его прекурсоров в крупном промышленном городе. Анализ данных показал, что сезонные колебания характеризуются повышением концентрации приземного озона, которое начинается в марте, и достижением максимума в июне. Концентрации оксидов азота были значительно выше в зимний период из-за увеличения антропогенных выбросов в отопительный сезон и формирования температурных инверсий, приводящих к накоплению в приземном слое загрязняющих веществ.

Был проанализирован эпизод формирования инверсионного слоя в период зимнего блокирующего антициклона. Изученные явления связаны с антициклонным характером климата в зимний период, на который накладывается тепловая аномалия, вызванная интенсивными промышленными процессами. В этих условиях концентрация NO_2 на отдельных постах мониторинга увеличивалась до 150 мкг/м^3 . Исследование имеет важное значение для регулирования и мониторинга деятельности предприятий. В периоды НМУ предприятия должны не только снижать выбросы, но и более оптимально перераспределять их в течение всего суточного цикла.

Анализ суточного хода концентраций приземного озона выявил наличие ночных максимумов озона, в отдельные периоды ночные концентрации превышают их максимальные дневные концентрации.

Список литературы

- Марочко А.Ю., Шойхет Я.Н., Лазарев А.Ф. 2011. Содержание озона, антропогенное загрязнение атмосферы и риск возникновения меланомы кожи. Дальневосточный медицинский журнал, 1: 29–30.
- Симакина Т.Е. Крюкова С.В. 2020. Пространственно-временное распределение концентрации приземного озона в Санкт-Петербурге. Гидрометеорология и экология. Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, 61: 407–420. <https://doi.org/10.33933/2074-2762-2020-61-407-420>.
- Смертин Г.Ю., Насырова Э.С. 2023. Исследование острова тепла города Уфа по данным спутниковых снимков. Успехи современного естествознания, 5: 42–47. <https://doi.org/10.17513/use.38039>.
- Andreev V.V., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Elansky N.F., ... Shiroto V.V. 2021. Surface Ozone Concentration over Russian Territory in the First Half of 2020. Atmospheric and Oceanic Optics, 33(6): 671–681. <https://doi.org/10.1134/S1024856020060184>.
- Andreev V.V., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., ... Shukurov K.A. 2022. Tropospheric Ozone Concentration on the Territory of Russia in 2021. Atmospheric and Oceanic Optics, 35(6): 741–757. <https://doi.org/10.1134/S1024856022060033>.
- Berezina E.V., Moiseenko K.B., Skorokhod A.I., Pankratova N.V., Belikov I., ... Elansky N.F. 2020. Impact of VOCs and NO_x on Ozone Formation in Moscow. Atmosphere, 11(11): 1262. <https://doi.org/10.3390/atmos11111262>.
- Dewan S., Lakhani A. 2022. Tropospheric Ozone and Its Natural Precursors Impacted by Climatic Changes in Emission and Dynamics. Frontiers Environmental Science, 10: 1007942. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1007942>.
- Di Bernardino A., Mevi G., Iannarelli A.M., Falasca S., Cede A., ... Casadio S. 2023. Temporal Variation of NO_2 and O_3 in Rome (Italy) from Pandora and in Situ Measurements. Atmosphere, 14(3): 594. <https://doi.org/10.3390/atmos14030594>.
- Donzelli G., Suarez-Varela M.M. 2024. Tropospheric Ozone: a Critical Review of the Literature on Emissions, Exposure, and Health Effects. Atmosphere, 15(7): 779. <https://doi.org/10.3390/atmos15070779>.
- Krupnova T.G., Rakova O.V., Plaksina A.L., Gavrilkina S.V., Baranov E.O., Abramyan A.D. 2020. Short Communication: Effect of Urban Greening and Land Use on Air Pollution in Chelyabinsk, Russia. Biodiversitas, 21(6): 2716–2720. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d210646>.

- Krupnova T.G., Rakova O.V., Simakhina V.I., Vykhodtseva E.A., Kochegorov V.M. 2024. Surface Ozone in the Industrial City of Chelyabinsk, Russia. *Geography, Environment, Sustainability*, 17(4): 223–234. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2024-3364>.
- Lai L.W., Cheng W.L. 2009. Air Quality Influenced by Urban Heat Island Coupled with Synoptic Weather Patterns. *The Science of the Total Environment*, 407(8): 2724–2733. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.002>.
- Moiseenko K.B., Vasileva A.V., Skorokhod A.I., Belikov I.V., Repin A.Y., Shtabkin Y.A. 2021. Regional Impact of Ozone Precursor Emissions on NO_x and O₃ Levels at ZOTTO Tall Tower in Central Siberia. *Earth and Space Science*, 8(7): e2021EA001762. <https://doi.org/10.1029/2021EA001762>.
- Mousavinezhad S., Ghahremanloo M., Choi Y., Pouyaei A., Khorshidian N., Sadeghi B. 2023. Surface Ozone Trends and Related Mortality Across the Climate Regions of the Contiguous United States During the Most Recent Climate Period, 1991–2020. *Atmospheric Environment*, 300: 119693. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119693>.
- Nguyen D.H., Lin C., Vu C., Vo T.D.H., Bui X.T. 2022. Tropospheric Ozone and NO_x: A Review of Worldwide Variation and Meteorological Influences. *Environmental Technology and Innovation*, 28(1):102809. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102809>.
- Pichelli E., Ferretti R., Cacciani M., Siani A.M., Ciardini V., Di Iorio T. 2014. The Role of Urban Boundary Layer Investigated with High-Resolution Models and Ground-Based Observations in Rome Area: a Step Towards Understanding Parameterization Potentialities. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(1): 315–332. <https://doi.org/10.5194/amt-7-315-2014>.
- Salonen H., Salthammer T., Morawska L. 2018. Human Exposure to Ozone in School and Office Indoor Environments. *Environment International*, 119: 503–514. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.07.012>.
- Stathopoulou E., Mihalakakou G., Santamouris M., Bagiorgas H.S. 2008. On the Impact of Temperature on Tropospheric Ozone Concentration Levels in Urban Environments. *Journal of Earth System Science*, 117(3): 227–236. <https://doi.org/10.1007/s12040-008-0027-9>.
- Thorp T., Arnold S.R., Pope R.J., Spracklen D.V., Conibear L., ... Petäjä T. 2021. Late-Spring and Summertime Tropospheric Ozone and NO₂ in Western Siberia and the Russian Arctic: Regional Model Evaluation and Sensitivities. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(6): 4677–4697. <https://doi.org/10.5194/acp-21-4677-2021>.
- Virolainen Y.A., Ionov D.V., Polyakov A.V. 2023. Analysis of Long-Term Measurements of Tropospheric Ozone at the St. Petersburg State University Observational Site in Peterhof. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 59(3): 287–295. <https://doi.org/10.1134/S000143382303009X>.
- Zhang J., Wei Y., Fang Z. 2019. Ozone Pollution: A Major Health Hazard Worldwide. *Frontiers in Immunology*, 10: 2518. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2019.02518>.

References

- Marochko A.Yu., Shoykhet Ya.N., Lazarev A.F. 2011. Ozone Content, Anthropogenic Pollution of the Atmosphere and the Risk of Skin Melanoma. *Dal'nevostochnyy meditsinskiy zhurnal*, 1: 29–30 (in Russian).
- Simakhina T.E., Kryukova S.V. 2020. Spatio-Temporal Distribution of Surface Ozone in Saint Petersburg. *Hydrometeorology and Ecology. Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*, 61: 407–420 (in Russian). <https://doi.org/10.33933/2074-2762-2020-61-407-420>.
- Smertin G.Yu., Nasyrova E.S. 2023. Research of Heat Island in Ufa City According to Satellite Images. *Advances in Current Natural Sciences*, 5: 42–47 (in Russian). <https://doi.org/10.17513/use.38039>.
- Andreev V.V., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Elansky N.F., ... Shiroto V.V. 2021. Surface Ozone Concentration over Russian Territory in the First Half of 2020. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 33(6): 671–681. <https://doi.org/10.1134/S1024856020060184>.
- Andreev V.V., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., ... Shukurov K.A. 2022. Tropospheric Ozone Concentration on the Territory of Russia in 2021. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 35(6): 741–757. <https://doi.org/10.1134/S1024856022060033>.
- Berezina E.V., Moiseenko K.B., Skorokhod A.I., Pankratova N.V., Belikov I., ... Elansky N.F. 2020. Impact of VOCs and NO_x on Ozone Formation in Moscow. *Atmosphere*, 11(11): 1262. <https://doi.org/10.3390/atmos11111262>.

- Dewan S., Lakhani A. 2022. Tropospheric Ozone and Its Natural Precursors Impacted by Climatic Changes in Emission and Dynamics. *Frontiers Environmental Science*, 10: 1007942. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1007942>.
- Di Bernardino A., Mevi G., Iannarelli A.M., Falasca S., Cede A., ... Casadio S. 2023. Temporal Variation of NO₂ and O₃ in Rome (Italy) from Pandora and in Situ Measurements. *Atmosphere*, 14(3): 594. <https://doi.org/10.3390/atmos14030594>.
- Donzelli G., Suarez-Varela M.M. 2024. Tropospheric Ozone: a Critical Review of the Literature on Emissions, Exposure, and Health Effects. *Atmosphere*, 15(7): 779. <https://doi.org/10.3390/atmos15070779>.
- Krupnova T.G., Rakova O.V., Plaksina A.L., Gavrilkina S.V., Baranov E.O., Abramyan A.D. 2020. Short Communication: Effect of Urban Greening and Land Use on Air Pollution in Chelyabinsk, Russia. *Biodiversitas*, 21(6): 2716–2720. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d210646>.
- Krupnova T.G., Rakova O.V., Simakhina V.I., Vykhodtseva E.A., Kochegorov V.M. 2024. Surface Ozone in the Industrial City of Chelyabinsk, Russia. *Geography, Environment, Sustainability*, 17(4): 223–234. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2024-3364>.
- Lai L.W., Cheng W.L. 2009. Air Quality Influenced by Urban Heat Island Coupled with Synoptic Weather Patterns. *The Science of the Total Environment*, 407(8): 2724–2733. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.002>.
- Moiseenko K.B., Vasileva A.V., Skorokhod A.I., Belikov I.V., Repin A.Y., Shtabkin Y.A. 2021. Regional Impact of Ozone Precursor Emissions on NO_x and O₃ Levels at ZOTTO Tall Tower in Central Siberia. *Earth and Space Science*, 8(7): e2021EA001762. <https://doi.org/10.1029/2021EA001762>.
- Mousavinezhad S., Ghahremanloo M., Choi Y., Pouyaei A., Khorshidian N., Sadeghi B. 2023. Surface Ozone Trends and Related Mortality Across the Climate Regions of the Contiguous United States During the Most Recent Climate Period, 1991–2020. *Atmospheric Environment*, 300: 119693. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119693>.
- Nguyen D.H., Lin C., Vu C., Vo T.D.H., Bui X.T. 2022. Tropospheric Ozone and NO_x: A Review of Worldwide Variation and Meteorological Influences. *Environmental Technology and Innovation*, 28(1):102809. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102809>.
- Pichelli E., Ferretti R., Cacciani M., Siani A.M., Ciardini V., Di Iorio T. 2014. The Role of Urban Boundary Layer Investigated with High-Resolution Models and Ground-Based Observations in Rome Area: a Step Towards Understanding Parameterization Potentialities. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(1): 315–332. <https://doi.org/10.5194/amt-7-315-2014>.
- Salonen H., Salthammer T., Morawska L. 2018. Human Exposure to Ozone in School and Office Indoor Environments. *Environment International*, 119: 503–514. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.07.012>.
- Stathopoulou E., Mihalakakou G., Santamouris M., Bagiorgas H.S. 2008. On the Impact of Temperature on Tropospheric Ozone Concentration Levels in Urban Environments. *Journal of Earth System Science*, 117(3): 227–236. <https://doi.org/10.1007/s12040-008-0027-9>.
- Thorp T., Arnold S.R., Pope R.J., Spracklen D.V., Conibear L., ... Petäjä T. 2021. Late-Spring and Summertime Tropospheric Ozone and NO₂ in Western Siberia and the Russian Arctic: Regional Model Evaluation and Sensitivities. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(6): 4677–4697. <https://doi.org/10.5194/acp-21-4677-2021>.
- Virolainen Y.A., Ionov D.V., Polyakov A.V. 2023. Analysis of Long-Term Measurements of Tropospheric Ozone at the St. Petersburg State University Observational Site in Peterhof. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 59(3): 287–295. <https://doi.org/10.1134/S000143382303009X>.
- Zhang J., Wei Y., Fang Z. 2019. Ozone Pollution: A Major Health Hazard Worldwide. *Frontiers in Immunology*, 10: 2518. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2019.02518>.

*Поступила в редакцию 15.07.2025;
поступила после рецензирования 29.08.2025;
принята к публикации 02.10.2025*

*Received July 15, 2025;
Revised August 29, 2025;
Accepted October 02, 2025*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.
Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ракова Ольга Викторовна, кандидат химических наук, доцент кафедры экологии и химической технологии, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Крупнова Татьяна Георгиевна, кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры экологии и химической технологии, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Стручкова Галина Прокопьевна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела геоинформатики, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Россия

Кочегоров Валерий Михайлович, начальник филиала, Челябинский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – филиал ФГБУ «Уральское УГМС», г. Челябинск, Россия

Выходцева Екатерина Александровна, начальник отдела метеорологических прогнозов, Челябинский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – филиал ФГБУ «Уральское УГМС», г. Челябинск, Россия

Капитонова Тамара Афанасьевна, кандидат физико-математических наук, И.о. заведующего отделом геоинформатики, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Россия

Тихонова Сардана Алексеевна, научный сотрудник отдела геоинформатики, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Olga V. Rakova, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Ecology and Chemical Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Tatyana G. Krupnova, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Associate Professor, Department of Ecology and Chemical Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Galina P. Struchkova, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Department of Geoinformatics, V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

Valeriy M. Kochegorov, Branch Manager, Chelyabinsk Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring – branch of the Ural Hydrometeorological Center, Chelyabinsk, Russia

Ekaterina A. Vykhardtseva, Head of the Meteorological Forecasting Department, Chelyabinsk Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring – branch of the Ural Hydrometeorological Center, Chelyabinsk, Russia

Tamara A. Kapitonova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Acting Head of the Department of Geoinformatics, V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

Sardana A. Tikhonova, Researcher, Department of Geoinformatics, V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia