

Высотное распределение диоксида азота на территории Приволжского федерального округа

Г. И. Шишкин, В. В. Гурьянов✉

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Российская Федерация
(420097, г. Казань, ул. Товарищеская, 5)

Аннотация. Цель – изучение особенностей высотного распределения диоксида азота в тропо- и стратосфере Приволжского федерального округа (ПФО) за период 2003-2023 гг.

Материалы и методы. Исходными данными послужили многоуровневые данные глобального реанализа CAMS (EAC4) по ПФО за рассматриваемый временной период.

Результаты и обсуждение. Проанализирована сезонная вариация содержания NO_2 в толще тропо- и стратосферы, а также проведён тренд-анализ.

Выводы: 1. Среднее содержание NO_2 максимально вблизи 1000 гПа (12700 ppt), с увеличением высоты резко падает (≤ 38 ppt на 18 км). Вблизи 10 гПа наблюдается рост (до 5900 ppt). В слоях 5-1 гПа вновь снижается (≤ 124 ppt). 2. Сезонная изменчивость NO_2 проявляется в разной степени на различных барических уровнях: на уровнях 1000-700 гПа максимумы среднего содержания NO_2 наблюдаются зимой-весной, минимумы – летом; на 500-200 гПа максимумы отмечены зимой, минимумы – весной; в слое 100-10 гПа максимумы выявлены весной-летом, минимумы – зимой; на 7-1 гПа максимумы концентрации NO_2 осенью, минимумы – в весенне-летний период. 3. Вблизи земли значимое накопление NO_2 летом до 830 ppt/10 лет. В зимний период значимая тенденция к рассеянию примеси > 1110 ppt/10 лет в южных и юго-восточных районах ПФО. Выше 9 км зафиксирована значимая тенденция к накоплению NO_2 в весенне-летний период. Так, на уровне 10 гПа в мае КНЛТ достиг 256,5 ppt/10 лет. В осенне-зимний период значимых тенденций NO_2 не обнаружено.

Ключевые слова: тропосфера, стратосфера, загрязняющие вещества, атмосферные примеси, диоксид азота.

Для цитирования: Шишкин Г.И., Гурьянов В.В. Высотное распределение диоксида азота на территории Приволжского федерального округа // *Вестник Воронежского государственного университета, Серия: География. Геоэкология*, 2025, № 3, с. 136-141. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/3/136-141>

ВВЕДЕНИЕ

Исследования состава атмосферы приобретают особую значимость в свете современных проблем климатологии и экологии. Цель работы состоит в комплексном изучении высотного распределения NO_2 на различных барических уровнях (от 1000 до 1 гПа) и тенденциях его изменчивости за период 2003-2023 гг. на территории ПФО – крупного экономического центра страны с высоким уровнем промышленного производства и транспортной активности.

Оксиды азота (NO_x), в целом, относятся к одним из самых важных ингредиентов-загрязнителей воздуха [4, 5]. Диоксид азота является климатически и экологически значимой переменной, принимая участие во множестве атмосферных реакций, в том числе, участвуя в генерации тропосферного и разложении стратосферного озона [1, 2]. Процессы, связанные с преобразованием NO_2 в атмосфере, приводят к образованию азотистой кислоты (HONO), которая является значимым предшественником радикала OH . Этот радикал, обладая высокой окислительной способностью, выполняет функцию «моющего средства» для атмосферы [10]. NO_2 входит в число примесей, мониторингом содержания которых

системно занимаются территориальные подразделения Росгидромета, и по которым довольно часто фиксируются превышения предельных допустимых концентраций [6-9]. Таким образом, понимание структуры и динамики распределения NO_2 в атмосфере крайне важно.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходным материалом исследования послужили данные реанализа EAC4 (CAMS) за период 2003-2023 гг. с горизонтальным разрешением $0,75^\circ \times 0,75^\circ$ по широте/долготе (около 80 км), представленные изучаемой переменной по барическим уровням: 1000, 950, ... 1 гПа [3]. EAC4 (CAMS) интегрирует модельные данные с глобальными наблюдениями, основываясь на принципах ассимиляции данных. Система усвоения способна оценивать погрешности между наблюдениями и качественно дифференцировать данные. Выбор конкретного временного интервала обусловлен недостаточной плотностью сети до 2003 года, что вызывало неточности в анализе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание диоксида азота в атмосфере представляет собой сложную систему, зависящую от совокупности физико-химических процессов, происходящих в разных её слоях. Согласно проведённым расчётам, со-



держание NO_2 в атмосфере существенно варьируется в зависимости от высоты и атмосферного давления. Максимальное содержание выявлено вблизи земной поверхности (до 12700 ppt), где доминируют мощные антропогенные источники выбросов: объекты промышленности, ТЭС, автотранспорт. Ещё одним важным источником образования NO_2 в более верхних слоях является процесс фотохимического преобразования монооксида азота (NO) под воздействием солнечных лучей. По мере увеличения высоты до 70-мб поверхности, концентрация NO_2 резко падает (на высоте 18 км не превышает 38 ppt). Этому способствуют снижение плотности атмосферы, уменьшение содержания оксида азота (NO), ограниченность эмиссионного вклада и преобладание реакции фотолиза. Однако, вблизи 10-мб поверхности вновь фиксируется постепенный рост концентрации NO_2 (до 5900 ppt), что связано с наличием слоя повышенной концентрации озона, активно участвующего в реакциях образования и трансформации азотистых соединений. O_3 способен инициировать реакцию восстановления N_2O_5 до HONO , который впоследствии преобразуется в NO_2 . Кроме того, вторичными источниками образования небольшого количества NO_2 являются электрическая активность атмосферы, а также космическое излучение. Далее, в слоях 5-1 гПа уровень NO_2 снова снижается (не превышая 124 ppt на 1-мб поверхности). Объясняется это ослаблением роли фотоиницированных реакций, дефицитом кислородных соединений и низкой плотностью атмосферы, что делает невозможным значительное накопление и удерживание загрязняющих веществ.

Выявлена выраженная сезонная изменчивость средних значений NO_2 . В различных слоях атмосферы наблюдались сезонные сдвиги, обусловленные множеством факторов.

Так, на уровнях 1000-700 гПа, минимумы средних концентраций вещества наблюдаются в летний, мак-

симумы – в зимне-весенний период. Можно предположить, что это связано с сезонными изменениями в эмиссии NO_2 : в зимний период в структуру эмиссии в регионе включается работа отопительных систем, что приводит к повышению выбросов NO_2 в нижних слоях тропосферы. Кроме того, в зимний период на фоне возрастающей циклонической активности на территории ПФО происходит интенсивное турбулентное перемешивание, что способствует выносу NO_2 из нижних слоев тропосферы в более высокие. Летние месяцы характеризуются высокими температурами и значительно более активным фотохимическим разложением NO_2 , что способствует снижению его концентрации.

На уровнях 500-200 гПа, где минимумы наблюдаются в марте, а относительные максимумы средних концентраций – в декабре-январе, что связано с фотохимическими и атмосферными процессами. С одной стороны, в мартовский минимум может объясняться быстрым темпом фотохимического разложения, на фоне роста солнечной активности, с другой стороны, нестабильностью атмосферных условий. В зимний период фотохимическая активность минимальна, что ограничивает разложение NO_2 .

Далее, на уровнях 100-10 гПа минимумы фиксируются уже в зимний период, а максимумы – в весенне-летний на фоне активизации фотохимических реакций с участием озона и образованием молекул диоксида азота и кислорода.

Наконец, на уровнях 7-1 гПа минимумы среднего содержания NO_2 фиксируются в весенне-летний период, а максимумы – осенью. На данных высотах, в условиях разреженной атмосферы, единственным актуальным механизмом формирования и разрушения NO_2 остаётся фотохимия. Реакции фотолиза здесь происходят очень быстро. При этом в отсутствии активных процессов восстановления NO_2 (в частности, реакции

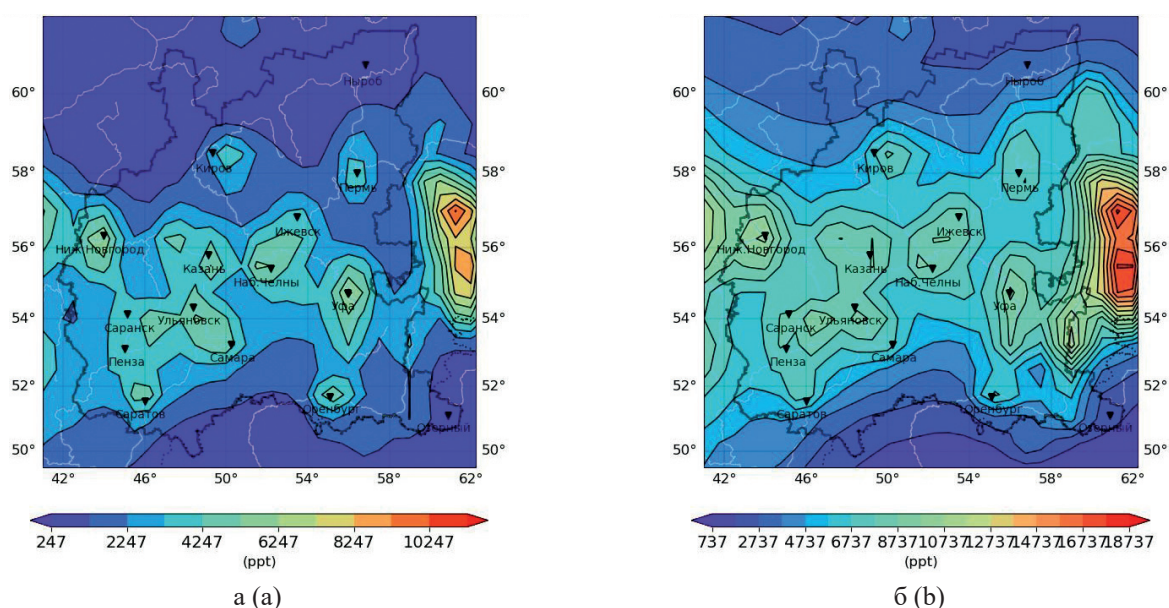


Рис. 1. Среднее содержание NO_2 на 1000-мб поверхности в а) июне; б) январе за период 2003-2023 гг.
[Fig. 1. Average NO_2 content per 1000-mb surface area in а) June; б) January for the period 2003-2023]

с озоном, которого в этих слоях крайне мало), свободный NO_2 не накапливается. Осенью, при ослаблении солнечной активности, фотолиз NO_2 замедляется. Ранее разорвавшиеся молекулы NO начинают восстанавливаться в NO_2 благодаря другим фотохимическим реакциям.

Ниже приведены карты (рис. 1-3), демонстрирующие вариацию средних полей NO_2 вблизи земли, на уровнях 500 гПа, а также 50 гПа. В качестве наиболее показательных приведены карты с минимальными (а) и максимальными (б) значениями средних концентраций NO_2 на соответствующих уровнях за период 2003-2023 гг.

Для выявления тенденции изменчивости был вычислен коэффициент наклона линейного тренда содержания

NO_2 в тропо- и стратосферных слоях на территории ПФО за рассматриваемый временной период. Вблизи земли значимое накопление NO_2 отмечено в летний период с максимальными значениями вблизи крупных промышленных городов (более 830 ppt/10 лет) (рис. 4б). Несмотря на высокие показатели среднего содержания NO_2 в зимний период, в декабре значимое накопление примеси отмечено лишь локально, а в феврале в южных и юго-восточных районах ПФО наблюдается значимая тенденция к рассеянию примеси. Данный факт объясняется отсутствием в этих районах крупных источников эмиссии (рис. 4а), а также макромасштабной циклонической деятельностью в зимний сезон в регионе, которая способствует вымыванию и

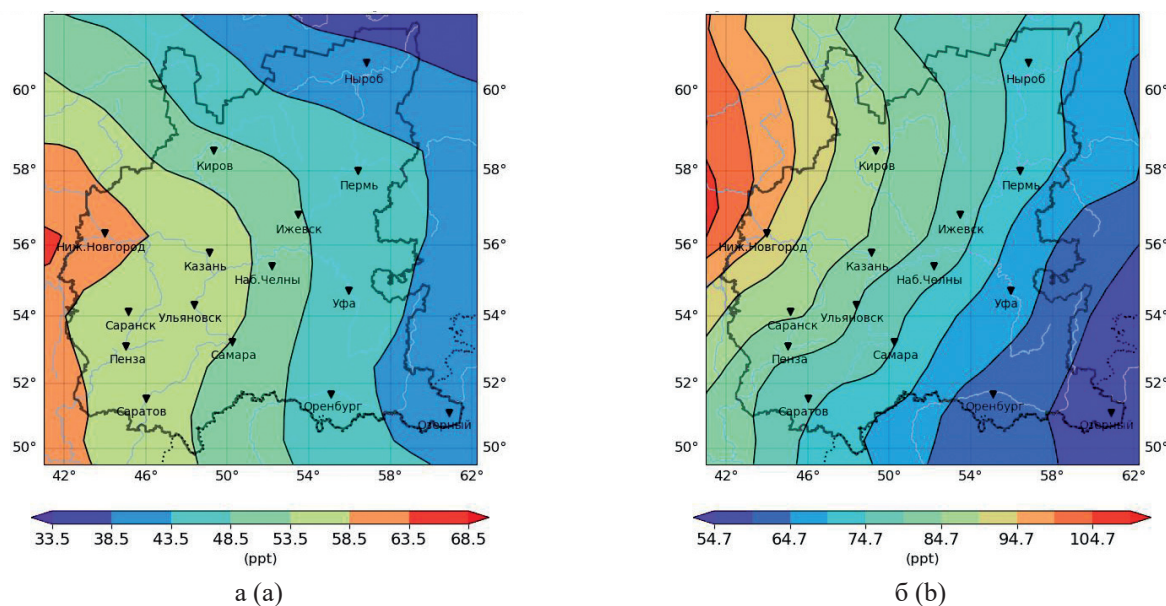


Рис. 2. Среднее содержание NO_2 на 500-мб поверхности в а) марте; б) декабре за период 2003-2023 гг.
[Fig. 2. Average NO_2 content per 500-mb surface in а) March; б) December for the period 2003-2023]

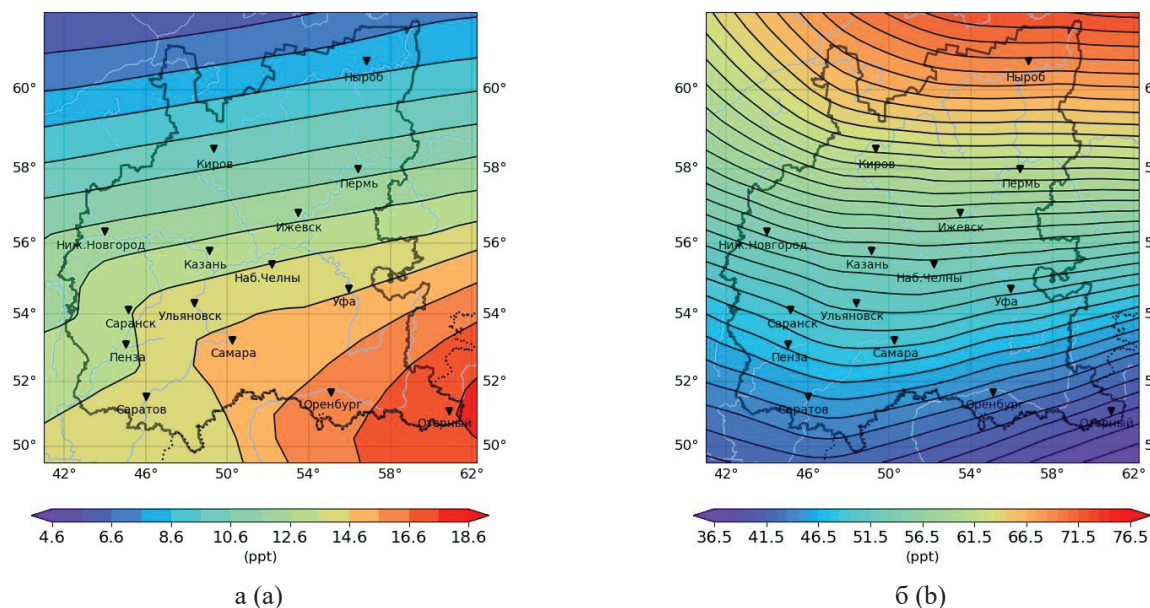


Рис. 3. Среднее содержание NO_2 на 50-мб поверхности в а) декабре; б) март за период 2003-2023 гг.
[Fig. 3. Average NO_2 content per 50-mb surface in а) December; б) March for the period 2003-2023]

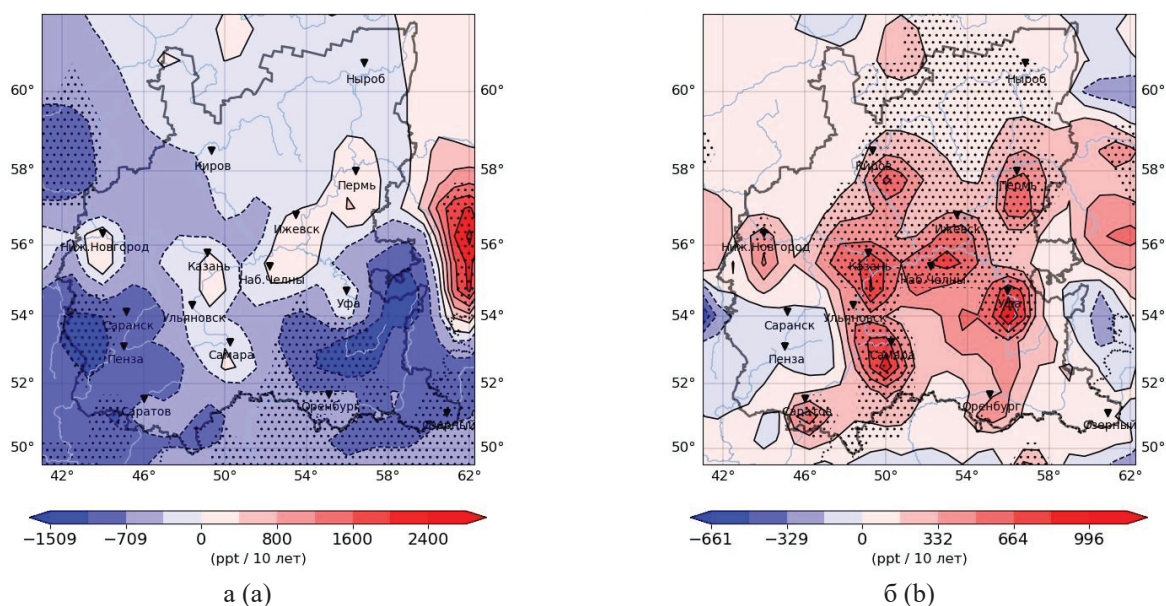


Рис. 4. Коэффициент наклона линейного тренда содержания NO₂ на 1000-мб поверхности в а) феврале; б) июле за период 2003–2023 гг. (точками отмечены области со значимостью 95 % и выше)

[Fig. 4. Slope coefficient of the linear trend of NO₂ content per 1000-mb surface in a) February; b) July for the period 2003–2023 (dots marked areas with a significance of 95% and higher)]

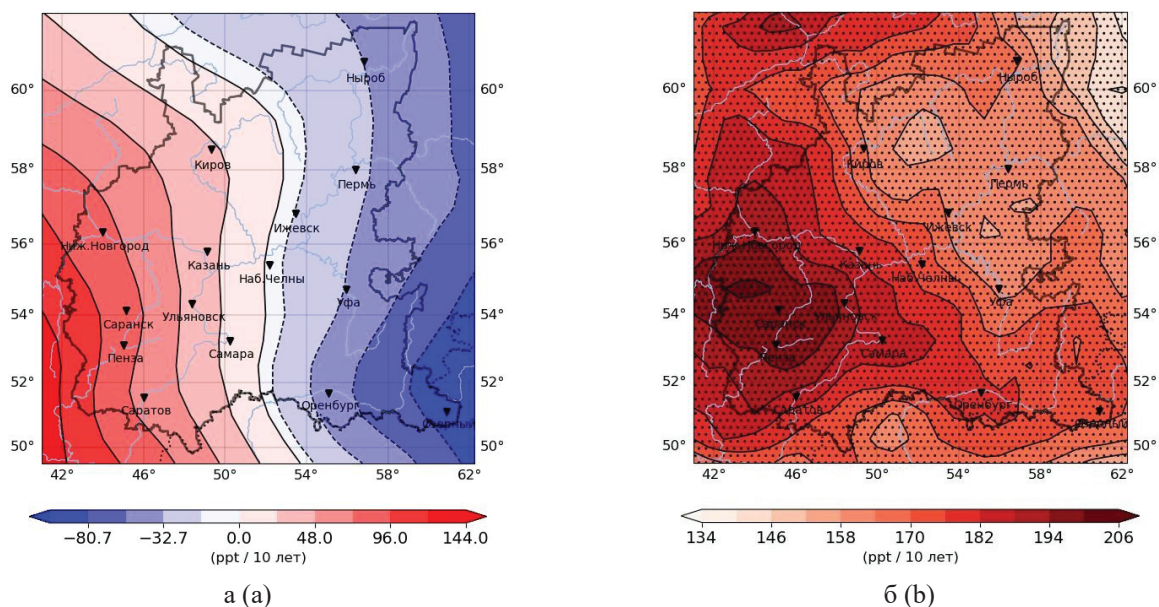


Рис. 5. Коэффициент наклона линейного тренда содержания NO₂ на 10-мб поверхности в а) январе; б) июле за период 2003–2023 гг. (точками отмечены области со значимостью 95% и выше)

[Fig. 5. Slope coefficient of the linear trend of NO₂ content per 10-mb surface in a) January; b) July for the period 2003–2023 (dots marked areas with significance of 95% and higher)]

рассеянию NO₂ из нижних и средних слоёв тропосферы (вплоть до 7 км высоты).

Выше 9 км в атмосфере при активном влиянии описанных выше фотохимических процессов наблюдается значимая тенденция к накоплению NO₂ в период в весенне-летних максимумов его концентрации. Так, на уровне 10 гПа в мае КНЛТ достиг 256,5 ppt/10 лет; в осенне-зимний период года значимых тенденций выявлено не было (рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе исследования, за период 2003–2023 гг. были выявлены следующие закономерности:

1. Содержание NO₂ максимально вблизи земной поверхности (достигая 12700 ppt). По мере увеличения высоты концентрация NO₂ падает (≤ 38 ppt на высоте 18 км), что обусловлено уменьшением плотности атмосферы, снижением содержания NO и реакцией фотолитиза. Вблизи 10 гПа наблюдается рост концентрации

NO₂ (до 5900 ppt), обусловленный наличием слоя повышенной концентрации озона, участвующего в восстановлении NO₂. В слоях 5–1 гПа концентрация NO₂ снова снижается (≤ 124 ppt), что связано с ослаблением фотохимических реакций, низким содержанием кислородных соединений и недостаточной плотностью атмосферы, препятствующими накоплению NO₂.

2. Сезонная изменчивость NO₂ проявляется в разной степени на различных поверхностях:

- В слое 1000–700 гПа максимумы среднего содержания NO₂ наблюдаются зимой-весной, минимумы – летом, что связано с сезонными изменениями эмиссии и турбулентностью атмосферы.

- На уровнях 500–200 гПа максимумы отмечены зимой, минимумы – весной, что обусловлено фотохимическими и атмосферными процессами.

- В слое 100–10 гПа максимумы зарегистрированы весной-летом, минимумы – зимой, что связано с фотохимическими реакциями и восстановительными процессами.

- На уровнях 7–1 гПа максимумы концентрации NO₂ фиксируются осенью, минимумы – весной-летом, что обусловлено динамикой фотохимических процессов и отсутствием значимых источников восстановления NO₂ в остальные времена года.

3. Вблизи земли значимое накопление NO₂ наблюдается летом вблизи крупных промышленных центров (до 830 ppt/10 лет). В зимний период значимое накопление отмечено лишь локально вблизи от крупных источников эмиссии, в южных и юго-восточных районах ПФО – тенденция к рассеянию примеси (> 1110 ppt/10 лет). Выше 9 км в атмосфере зафиксирована значимая тенденция к накоплению NO₂ в весенне-летний период. Так, на уровне 10 гПа в мае КНЛТ достиг величины 256,5 ppt/10 лет. В осенне-зимний период значимых тенденций NO₂ не обнаружено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Белан Б.Д. Тропосферный озон. 6. Компоненты озоновых циклов // *Оптика атмосферы и океана*, 2009, № 4, с. 358–379.

2. Глобальная система наблюдения за климатом (ГЧНК). – URL: <https://gcos.wmo.int/ru/node/24857/> (дата обращения: 01.06.2025). – Текст электронный.

3. Данные реанализа состава атмосферы ECMWF четвертого поколения. – URL: <https://ads.atmosphere.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/cams-global-reanalysis-eac4?tab=overview> (дата обращения: 30.04.2025). – Текст: электронный.

4. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2022 году: государственный доклад. Москва: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2023. 368 с.

5. Оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха города Казани диоксидом азота по данным спутниковой съемки Sentinel-5P / О.В. Никитин, Р.С. Кузьмин, И.И. Вазиев и др. // *Материалы XXI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем»*, 2023, с. 50–54.

6. ФГБУ «Башкирское УГМС»: официальный сайт. – URL: <https://www.meteorb.ru/> (дата обращения: 02.05.2025). – Текст электронный.

7. ФГБУ «Верхне-Волжское УГМС»: официальный сайт. – URL: <https://vvugms.meteorf.ru/> (дата обращения: 02.05.2025). – Текст электронный.

8. ФГБУ «Приволжское УГМС»: официальный сайт. – URL: <http://pogoda-sv.ru/> (дата обращения: 02.05.2025). – Текст электронный.

9. ФГБУ «Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Республики Татарстан»: официальный сайт. – URL: <http://www.tatarmeteo.ru/> (дата обращения: 02.05.2025). – Текст электронный.

10. Quantification of the unknown HONO daytime source and its relation to NO₂ / M. Sörgel, E. Regelin, H. Bozem, J.-M. Diesch, F. Drewnick, H. Fischer, H. Harder, A. Held, Z. Hosaynali-Beygi, M. Martinez and C. Zetzsch // *Atmos. Chem. Phys.*, 2011, no. 11, pp. 10433–10447.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию: 29.06.2025

Принята к публикации: 01.09.2025

UDC 504.3.054

DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/3/136-141>

ISSN 1609-0683

Altitude Distribution of Nitrogen Dioxide in the Volga Federal District

G.I. Shishkin, V.V. Guryanov✉

Kazan (Volga Region) Federal University, Russian Federation
(5, Tovarishcheskaya Str., Kazan, 420097)

Abstract. The purpose is to study the features of the altitude distribution of NO₂ in the troposphere and stratosphere of the Volga Federal District (VFD) for the period 2003–2023.

© Shishkin G. I., Guryanov V. V., 2025

✉ Vladimir V. Guryanov, e-mail: Vladimir.Guryanov@kpfu.ru



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Materials and methods. The multi-level data of the CAMS (EAC4) global re-analysis of VFD for the period under consideration served as initial data.

Results and discussion. The seasonal variation of the NO₂ content in the troposphere and stratosphere was analyzed, and a trend analysis was carried out.

Conclusions: 1. The average NO₂ content is maximum near 1000 hPa (12700 ppt), sharply decreasing with increasing altitude (≤ 38 ppt per 18 km). Around 10 hPa, growth is observed (up to 5900 ppt). In the 5-1 hPa layers, it decreases again (≤ 124 ppt). 2. The seasonal variability of NO₂ manifests itself to varying degrees at different baric levels: at 1000-700 hPa, the maximum average NO₂ content is observed in winter-spring, the minimum in summer; at 500-200 hPa, the maximum is noted in winter, the minimum in spring; in the 100-10 hPa layer, the maximum is revealed in spring-summer, the minimum in winter; at 7-1 hPa, the maximum NO₂ concentration is observed in autumn, and the minimum in spring-summer. 3. Near the ground there is a significant accumulation of NO₂ in summer up to 830 ppt/10 years. In winter, there is a significant trend of impurity dispersion > 1110 ppt/10 years in the southern and southeastern regions of the Volga Federal District. Above 9 km, a significant trend towards NO₂ accumulation was recorded during the spring-summer period. Thus, at the level of 10 hPa in May, the SCLT reached 256,5 ppt/10 years. No significant NO₂ trends were detected in the autumn-winter period.

Key words: troposphere, stratosphere, pollutants, atmospheric impurities, nitrogen dioxide.

For citation: Shishkin G. I., Guryanov V. V. Altitude Distribution of Nitrogen Dioxide in the Volga Federal District. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologia*, 2025, no. 3, pp. 136-141. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/3/136-141>

REFERENCES

1. Belan B. D. Troposfernyy ozon. 6. Komponenty ozonovykh ciklov [Tropospheric ozone. 6. Components of ozone cycles]. *Optika atmosfery i okeana*, 2009, № 4, pp. 358-379. (In Russ.)
2. Global Climate Monitoring System (GCOS). – URL: <https://gcos.wmo.int/ru/node/24857/> (accessed 01.06.2025). – Text: electronic. (In Russ.)
3. Fourth generation ECMWF atmospheric composition re-analysis data. – URL: <https://ads.atmosphere.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/cams-global-reanalysis-eac4?tab=overview> (accessed 30.04.2025). – Text: electronic. (In Russ.)
4. *O sostoyanii sanitarno-epidemiologicheskogo blagopoluchiya naseleniya v Rossijskoj Federacii v 2022 godu: gosudarstvennyj doklad* [On the state of sanitary and epidemiological well-being of the population in the Russian Federation in 2022: State report.] Moscow: Federal'naya sluzhba po nadzoru v sfere zashchity prav potrebitel'ej i blagopoluchiya cheloveka, 2023. 368 p. (In Russ.)
5. Ocenka urovnya zagryazneniya atmosfernogo vozduha goroda Kazani dioksidom azota po dannym sputnikovoj s"emki Sentinel-5P [Assessment of the level of atmospheric air pollution in the city of Kazan with nitrogen dioxide based on Sentinel-5P satellite imagery] / O. V. Nikitin, R. S. Kuz'min, I. I. Vaziev i dr. Materialy HXI Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Biodiagnostika sostoyaniya prirodnyh i prirodno-tekhnogennyh system», 2023, pp. 50-54. (In Russ.)
6. *Bashkir UGMS Federal State Budgetary Institution: official website*. – URL: <https://www.meteorb.ru/> (accessed: 02.05.2025). – Text: electronic. (In Russ.)
7. *Verkhne-Volzhskeye UGMS Federal State Budgetary Institution: official website*. – URL: <https://vvugms.meteorb.ru/> (accessed: 02.05.2025). – Text: electronic. (In Russ.)
8. *Volga Federal State Budgetary Institution UGMS: official website*. – URL: <http://pogoda-sv.ru/> (accessed: 02.05.2025). – Text: electronic. (In Russ.)
9. *Federal State Budgetary Institution «Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring of the Republic of Tatarstan»: official website*. – URL: <http://www.tatarmeteo.ru/> (accessed: 02.05.2025). – Text: electronic. (In Russ.)
10. Quantification of the unknown HONO daytime source and its relation to NO₂ / M. Sörgel, E. Regelin, H. Bozem, J.-M. Driesch, F. Drewnick, H. Fischer, H. Harder, A. Held, Z. Hosaynali-Beygi, M. Martinez and C. Zetzsch. *Atmos. Chem. Phys.*, 2011, no. 11, pp. 10433-10447.

Conflict of interests: The authors declare no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 29.06.2025

Accepted: 01.09.2025

Шишкин Георгий Игоревич

Ассистент кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы Института экологии, биотехнологии и природопользования Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Казань, Российская Федерация, ORCID: 0009-0001-6192-6291, e-mail: mr.GoraShi@mail.ru

Гурьянов Владимир Владимирович

Кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Казань, Российская Федерация, ORCID: 0000-0001-9353-7488, e-mail: Vladimir.Guryanov@kpfu.ru

George I. Shishkin

Assistant of the Department of Meteorology, Climatology and Atmospheric Ecology, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russian Federation, ORCID: 0009-0001-6192-6291, e-mail: mr.GoraShi@mail.ru

Vladimir V. Guryanov

Cand. Sci. (Geogr.), Assoc. Prof. at the Department of Meteorology, Climatology and Atmospheric Ecology, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-9353-7488, e-mail: Vladimir.Guryanov@kpfu.ru