

УДК 551.510

Связь пирогенных эмиссий NO₂ при лесных пожарах на территории России с атмосферными блокировками

И.И. Мохов^{1,2}, С.А. Ситнов¹, М.Н. Цидилина³, О.С. Воронова^{3*}

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

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские Горы, 1

³Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС»
105064, г. Москва, пер. Гороховский, 4

Поступила в редакцию 2.02.2021 г.

Анализ спутниковых данных и данных реанализа свидетельствует о связи пирогенных эмиссий NO₂ с атмосферными блокировками. Согласно полученным оценкам для периода 2001–2019 гг. при увеличении интегрального индекса блокирования на 10% суммарные выбросы NO₂ в атмосферу при лесных пожарах на территории России увеличиваются на 0,7 млн т. На фоне общего уменьшения пирогенной эмиссии NO₂ в 2001–2019 гг. выявлен статистически значимый рост плотности эмиссии NO₂ на единицу площади на 23%. При этом отмечено уменьшение суммарной эмиссии NO₂ при лесных пожарах относительно соответствующих выбросов угарного газа и мелкодисперсного аэрозоля.

Ключевые слова: диоксид азота, лесные пожары, пирогенная эмиссия, атмосферное блокирование; nitrogen dioxide, wildfires, pyrogenic emission, atmospheric blocking.

Введение

Диоксид азота (NO₂) — один из ключевых химически и радиационно активных газов атмосферы [1]. В стратосфере NO₂ участвует в каталитическом цикле разрушения озона, а его присутствие в атмосферном пограничном слое способствует образованию озона — токсичного газа первого класса опасности. Участвуя в реакциях с образованием гидроксила, оксиды азота влияют на способность атмосферы к самоочищению от ряда примесей, в частности от летучих органических соединений [2]. Будучи предшественниками нитратного аэрозоля, оксиды азота влияют на радиационный баланс атмосферы. Поглощение солнечной радиации NO₂ способствует дополнительному радиационному нагреву атмосферы [3], тогда как рассеяние солнечной радиации аэрозолями оказывает в целом охлаждающее влияние на атмосферу. Повышенная концентрация NO₂ в тропосфере существенно ухудшает качество атмосферного воздуха и негативно влияет на здоровье человека [4].

Источниками NO₂ в атмосфере являются автотранспорт, тепловые электростанции, авиация, грозовые разряды и почвенная эмиссия. В теплый период года важный источник формирования ре-

гиональных аномалий содержания NO₂ в атмосфере — массовые лесные пожары [5, 6]. В условиях продолжающегося глобального потепления риск развития лесных пожаров на территории России увеличивается [7–9]. Развитию природных пожаров в летние сезоны способствуют атмосферные блокирования [10]. Атмосферным блокированием называют установление над данной территорией обширного малоподвижного антициклона, затрудняющего (блокирующего) западный перенос воздушных масс в среднеширотной тропосфере. В летний период с продолжительными атмосферными блокировками связано формирование экстремально жарких засушливых погодных режимов, способствующих возникновению природных пожаров. Согласно [11] вероятность атмосферных блокирований, особенно наиболее длительных, увеличивается в условиях потепления.

Цель данной работы — анализ связи эмиссии NO₂ в атмосферу при лесных пожарах на территории России с атмосферными блокировками.

Используемые данные и методы анализа

Для оценки пирогенной эмиссии NO₂ при лесных пожарах на территории России в 2001–2019 гг. использовалась эмиссионная модель, предложенная в [12]:

$$E = ABCD,$$

* Игорь Иванович Мохов (mokhov@ifaran.ru); Сергей Африканович Ситнов (sitnov@ifaran.ru); Марина Николаевна Цидилина (tsidilina2910@gmail.com); Ольга Сергеевна Воронова (v_olya86@mail.ru).

где E – масса NO_2 , выбрасываемого в атмосферу (т); A – площадь, пройденная огнем (м^2); B – плотность биомассы ($\text{кг}/\text{м}^2$); C – доля сгоревшей биомассы (%); D – эмиссионный коэффициент, зависящий от типа сгораемой растительности ($\text{г}/\text{кг}$).

Площадь, пройденная огнем, предварительно определялась по данным детектирования активных пожаров (Active Fire Data) спутниковым спектро-радиометром MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) платформы Terra (MOD14) с низким пространственным разрешением 1 км. Эти данные уточнялись с использованием спутниковых изображений среднего разрешения (30–50 м), полученных со спутников Landsat и «Метеор-М», а также изображений высокого разрешения (~6 м) со спутника RapidEye [13]. По результатам сопоставления спутниковых изображений с различным пространственным разрешением оценивались поправочные коэффициенты для оперативного определения ежедневных площадей лесных пожаров [13, 14] в пожароопасные сезоны (апрель–октябрь) и суммарные за год площади пожаров на всей территории России [15].

Площадь, пройденная огнем, идентифицировалась с учетом типа почвы и растительного покрова по данным MODIS Land Cover Type 500 м (MCD12Q1, v. 6) [16, 17]. Для территории России выделялось 13 типов почвенно-растительного покрова: 4 класса лесного покрова, 4 класса кустарниковой, степной и луговой растительности, 2 класса сельхозугодий, 3 класса не покрытых растительностью территорий. При оценке эмиссии NO_2 использовались обновленные значения эмиссионных коэффициентов с применением результатов [18, 19].

Анализ аномалий атмосферной циркуляции проводился на основе данных реанализа NCEP/NCAR (<http://www.esrl.noaa.gov>) для геопотенциальных высот изобарической поверхности 500 гПа (H500) с широтно-долготным ($\Delta\varphi \times \Delta\lambda$) разрешением $2,5^\circ \times 2,5^\circ$. Для характеристики атмосферных блокирований на большой территории, в частности территории

России, И.И. Моховым и С.А. Ситновым предложен интегральный индекс блокирования I_b с использованием локальной диагностики атмосферного блокирования в каждом долготном секторе с $\Delta\lambda = 2,5^\circ$ (см. также [10]). Интегральный индекс блокирования I_b для конкретного временного интервала Δt , а именно для пожароопасных сезонов с апреля по октябрь (продолжительностью 214 сут) в российском долготном секторе $20\text{--}180^\circ$ в.д., определялся процентным отношением суммы дней с диагностированным атмосферным блокированием во всех локальных секторах $\Delta\lambda$ российского долготного сектора к максимально возможному количеству дней с атмосферным блокированием (64 локальных сектора \times 214 дней, всего 13696 дней). В качестве локального условия блокирования в настоящей работе использовался критерий, предложенный в [20], с необходимым условием его выполнения в течение не менее 5 последовательных суток.

Анализ результатов

Совместный анализ ежегодных эмиссий NO_2 и полей H500 в пожароопасные периоды 2001–2019 гг. выявил значимую связь эмиссии NO_2 в атмосферу при лесных пожарах на территории России с атмосферными блокированиями. На рис. 1 представлены межгодовые вариации E_{NO_2} – суммарных для территории России в период с апреля по октябрь выбросов NO_2 в атмосферу, обусловленных лесными пожарами, в сопоставлении с соответствующими вариациями индекса I_b для всей территории России в пожароопасные сезоны 2001–2019 гг. Согласно рис. 1 максимумы E_{NO_2} в целом соответствуют максимумам I_b , а минимумы E_{NO_2} – минимумам I_b . Эта закономерность нарушается лишь в 2010 г., когда аномально продолжительному периоду летнего атмосферного блокирования, отмечавшемуся в европейской части России, сопутствовали эмиссии NO_2 от пожаров на относительно ограниченной территории. Межгодовые вариации

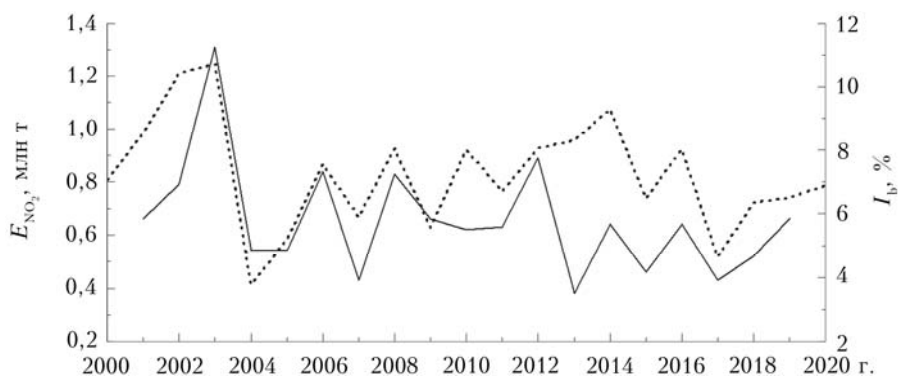


Рис. 1. Межгодовые вариации суммарных за апрель–октябрь пирогенных эмиссий NO_2 в атмосферу на территории России за 2001–2019 гг. (сплошная линия) в сопоставлении с соответствующими вариациями интегрального индекса блокирования (пунктирная линия)

E_{NO_2} и I_b в пожароопасные периоды 2001–2019 гг. характеризуются достаточно высоким коэффициентом корреляции $r = 0,63$ (95%-е доверительные интервалы 0,25 и 0,84).

На рис. 2 показаны вариации суммарной пирогенной эмиссии NO_2 в зависимости от интегрального индекса блокирования для российских регионов в 2001–2019 гг., на котором виден общий рост E_{NO_2} при росте I_b . Согласно оценке чувствительности E_{NO_2} к I_b на основе соответствующей линейной регрессии, суммарная эмиссия NO_2 при лесных пожарах на территории России увеличивается на 0,7 млн т при росте интегрального индекса блокирования на 10%.

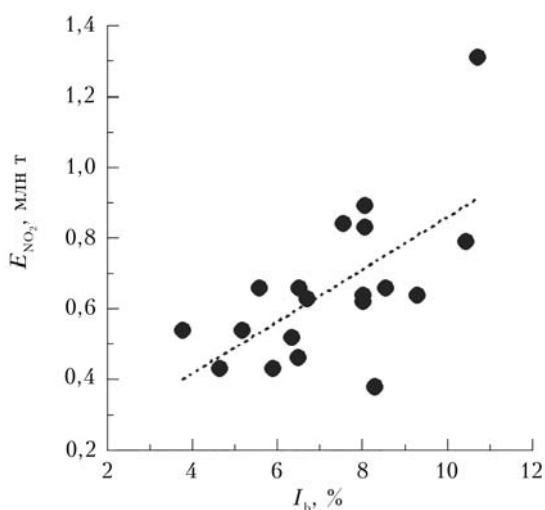


Рис. 2. Межгодовые вариации суммарной пирогенной эмиссии NO_2 в зависимости от вариаций интегрального индекса блокирования (пунктирная прямая соответствует линейной регрессии)

Межгодовые вариации объемов пирогенной эмиссии в атмосферу NO_2 с территории России в 2001–2019 гг. (рис. 1) характеризуются отрицательным статистически незначимым линейным трендом: $-15,8 (\pm 17,8)$ тыс. т/год. Снижение объемов суммарной эмиссии NO_2 от лесных пожаров можно связать с уменьшением ежегодных площадей лесных пожаров на территории России в последние два десятилетия, отмеченным в [15] (см. также [10]).

На рис. 3 приведены межгодовые вариации плотности пирогенной эмиссии NO_2 — отношения суммарной эмиссии NO_2 в атмосферу при лесных пожарах в апреле–октябре на территории России к общей площади пожаров (S). В отличие от суммарной эмиссии NO_2 плотность пирогенной эмиссии NO_2 на территории России в период 2001–2019 гг. характеризуется положительным статистически значимым трендом $43 (\pm 27)$ г · м⁻²/год и с начала 2000-х гг. увеличилась на 23%. Рост плотности эмиссии NO_2 можно связать как с уменьшением площади природных пожаров на территории России в первые два десятилетия XX в. [15],

так и с увеличением мощности среднего лесного пожара в России в этот период [21].

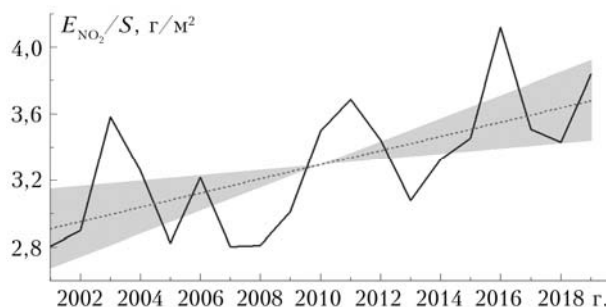


Рис. 3. Межгодовые вариации плотности суммарной пирогенной эмиссии NO_2 с территории России в 2001–2019 гг.: пунктирная прямая — линейный тренд, серый цвет — его 95%-е доверительные интервалы

Лесные пожары сопровождаются выбросами в атмосферу различных примесей, в том числе значительных объемов дымового аэрозоля и монооксида углерода (CO). Представляет интерес анализ многолетней динамики соотношений суммарных объемов пирогенных эмиссий NO_2 , CO и аэрозоля при лесных пожарах на территории России. На рис. 4 показаны оценки межгодовых вариаций отношения суммарных пирогенных эмиссий в атмосферу NO_2 к суммарным пирогенным эмиссиям CO (E_{NO_2}/E_{CO}) и отношения пирогенных эмиссий NO_2 к пирогенным

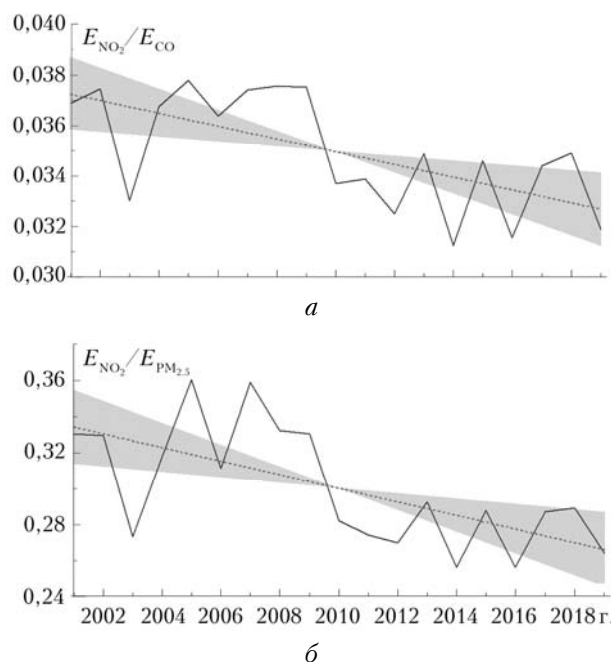


Рис. 4. Межгодовые вариации в пожароопасные сезоны 2001–2019 гг. отношений суммарных пирогенных эмиссий в атмосферу разных примесей: а — E_{NO_2}/E_{CO} ; б — $E_{NO_2}/E_{PM_{2,5}}$; пунктирные прямые — соответствующие линейные тренды, серый цвет — их 95%-е доверительные интервалы

эмиссиям мелкодисперсного аэрозоля по данным для $PM_{2.5}$ ($E_{NO_2}/E_{PM_{2.5}}$) для российских регионов в 2001–2019 гг.

Анализ отношений E_{NO_2}/E_{CO} (рис. 4, а) и $E_{NO_2}/E_{PM_{2.5}}$ (рис. 4, б) свидетельствует об общем уменьшении вышеуказанных отношений со статистически значимыми отрицательными линейными трендами $-7 (\pm 5)\%/10$ лет и $-13 (\pm 8)\%/10$ лет соответственно (в процентах к средним значениям E_{NO_2}/E_{CO} (0,035) и $E_{NO_2}/E_{PM_{2.5}}$ (0,30) за 2001–2019 гг.).

Заключение

Результаты анализа пирогенной эмиссии в атмосферу диоксида азота и особенностей тропосферной циркуляции в 2001–2019 гг. свидетельствуют о связи суммарной эмиссии NO_2 при лесных пожарах на территории России с режимами атмосферного блокирования. При росте интегрального индекса блокирования на 10% суммарные выбросы NO_2 в атмосферу при лесных пожарах на территории России увеличиваются на 0,7 млн т. Выявлено, что до 40% и более дисперсии межгодовой изменчивости суммарной пирогенной эмиссии в атмосферу NO_2 на территории России связано с атмосферными блокированиями.

Межгодовые изменения пирогенных эмиссий в атмосферу NO_2 в 2001–2019 гг. для России в целом характеризуются слабым статистически незначимым отрицательным трендом. При этом для вариаций плотности пирогенной эмиссии NO_2 с единицы площади российских пожаров отмечен положительный статистически значимый линейный тренд: $43 (\pm 27) \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}/\text{год}$. Результаты анализа ежегодных суммарных объемов эмиссий оксидов азота, монооксида углерода и дымового аэрозоля при лесных пожарах на территории России за 2001–2019 гг. показывают общее уменьшение отношений E_{NO_2}/E_{CO} и $E_{NO_2}/E_{PM_{2.5}}$ для суммарных пирогенных эмиссий NO_2 , CO и $PM_{2.5}$ с линейными трендами $-7 (\pm 5)\%/10$ лет и $-13 (\pm 8)\%/10$ лет соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2020-776).

1. Кароль И.Л. Мониторинг радиационно-активных газов атмосферы. Физические аспекты теории климата. Л.: Гидрометеониздат, 1990. С. 28–46.
2. Crutzen P.J. The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content // Q. J. R. Meteorol. Soc. 1970. V. 96. P. 320–325.
3. Vasilkov A.P., Joiner J., Oreopoulos L., Gleason J.F., Veefkind P., Bucseala E., Celarier E.A., Spurr R.J.D., Platnick S. Impact of tropospheric nitrogen dioxide on the regional radiation budget // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9. P. 6389–6400.
4. Boningari T., Smiriotis P. Impact of nitrogen oxides on the environment and human health: Mn-based materials for the NO_x abatement // Curr. Opin. Chem. Eng.

2016. V. 13. P. 133–141. DOI: 10.1016/j.coche.2016.09.004.
5. Mebust A.K., Russell A., Hudman R.C., Valin L.C., Cohen R.C. Characterization of wildfire NO_x emissions using MODIS fire radiative power and OMI tropospheric NO_2 columns // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11. P. 5839–5851.
6. Sitnov S.A., Mokhov I.I. Formaldehyde and nitrogen dioxide in the atmosphere during summer weather extremes and wildfires in European Russia in 2010 and Western Siberia in 2012 // Int. J. Remote Sens. 2017. V. 38, N 14. P. 4086–4106. DOI: 10.1080/01431161.2017.1312618.
7. Второй оценочный доклад Роскомгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с.
8. Мохов И.И., Чернокульский А.В., Школьник И.М. Региональные модельные оценки пожароопасности при глобальных изменениях климата // Докл. РАН. 2006. Т. 411, № 6. С. 808–811.
9. Мохов И.И., Чернокульский А.В. Региональные модельные оценки риска лесных пожаров в азиатской части России при изменениях климата // Геогр. и прир. ресурсы. 2010. № 2. С. 120–126.
10. Мохов И.И., Бондур В.Г., Ситнов С.А., Воронова О.С. Космический мониторинг природных пожаров и эмиссий в атмосферу продуктов горения на территории России: Связь с атмосферными блокированиями // Докл. АН. 2020. Т. 495, № 2. С. 61–66. DOI: 10.31857/S2686739720120087.
11. Мохов И.И., Тимажев А.В. Атмосферные блокирования и изменения их повторяемости в XXI веке по расчетам с ансамблем климатических моделей // Метеорол. и гидрол. 2019. № 6. С. 5–16.
12. Seiler W., Crutzen P.J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere from biomass burning // Clim. Change. 1980. V. 2. P. 207–247.
13. Бондур В.Г. Космический мониторинг эмиссий малых газовых компонент и аэрозолей при природных пожарах в России // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 6. С. 21–35. DOI: 10.7868/S0205961415060032.
14. Бондур В.Г., Гордо К.А., Кладов В.Л. Пространственно-временные распределения площадей природных пожаров и эмиссий углеродсодержащих газов и аэрозолей на территории Северной Евразии по данным космического мониторинга // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 6. С. 3–20. DOI: 10.7868/S0205961416060105.
15. Бондур В.Г., Мохов И.И., Воронова О.С., Ситнов С.А. Космический мониторинг сибирских пожаров и их последствий: особенности аномалий 2019 года и тенденции 20-летних изменений // Докл. АН. 2020. Т. 492. № 1. С. 99–106. DOI: 10.31857/S2686739720050047.
16. Бондур В.Г., Воронова О.С., Черепанова Е.В., Цидилина М.Н., Зима А.Л. Пространственно-временной анализ многолетних природных пожаров и эмиссий вредных газов и аэрозолей в России по космическим данным // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 4. С. 1–15.
17. Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A., Huang X. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets // Remote Sens. Environ. 2010. V. 114. P. 168–182.
18. Wiedinmyer C., Akagi S.K., Yokelson R.J., Emmons L.K., Al-Saadi J.A., Orlando J.J., Soja A.J. The Fire Inventory from NCAR (FINN): A high resolution

global model to estimate the emissions from open burning // *Geosci. Model Dev.* 2011. V. 4. P. 625–641. DOI: 10.5194/gmd-4-625-2011.

19. Akagi S.K., Yokelson R.J., Wiedinmyer C., Alvarado M.J., Reid J.S., Karl T., Crounse J.D., Wennberg P.O. Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 4039–4072.

20. Tibaldi S., Molteni F. On the operational predictability of blocking // *Tellus.* 1990. V. 42A. P. 343–365.

21. Ситнов С.А., Мохов И.И. Сравнительный анализ характеристик пожаров в бореальных лесах Евразии и Северной Америки по спутниковым данным // *Исслед. Земли из космоса.* 2018. № 2. С. 21–37. DOI: 10.7868/S0205961418020033.

I.I. Mokhov, S.A. Sitnov, M.N. Tsidilina, O.S. Voronova. Relationship of pyrogenic NO₂ emissions from wildfires in Russia with atmospheric blocking events.

Analysis of satellite and reanalysis data indicates a relationship between pyrogenic NO₂ emissions and atmospheric blocking events. According to the estimates for the period 2001–2019, with an increase in the integral blocking index by 10%, the total NO₂ emissions into the atmosphere during wildfires in Russia increase by 0.7 million tons. Against the background of a general decrease in 2001–2019 of pyrogenic NO₂ emission, a statistically significant increase in the NO₂ emission density per unit area by 23% was revealed. At the same time, a decrease in the total emission of NO₂ during wildfires was noted in relation to the corresponding emissions of carbon monoxide and fine aerosol.