

УДК 528.88:551.5

КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ И ЭМИССИЙ В АТМОСФЕРУ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ: СВЯЗЬ С АТМОСФЕРНЫМИ БЛОКИРОВАНИЯМИ

© 2020 г. Академик РАН И. И. Мохов^{2,3,*}, академик РАН В. Г. Бондур¹,
С. А. Ситнов², О. С. Воронова¹

Поступило 09.10.2020 г.

После доработки 12.10.2020 г.

Принято к публикации 12.10.2020 г.

С использованием спутниковых данных и данных реанализа получены оценки значимой связи площадей природных пожаров и вызванных ими эмиссий в воздушную среду продуктов горения с атмосферными блокировками на территории России за период времени с 2001 по 2019 г. Установлено, что вклад в дисперсию межгодовых изменений площадей пожаров и потоков продуктов горения в атмосферу, связанный с атмосферными блокировками, может достигать и даже превышать 40%. Выявлена тенденция увеличения плотности эмиссий продуктов горения в атмосферу, в том числе углекислого и угарного газов, а также мелкодисперсного аэрозоля, на фоне общего уменьшения площадей природных пожаров в первое 20-летие XXI века. При этом обнаружено уменьшение соотношения эмиссий угарного газа и мелкодисперсного аэрозоля.

Ключевые слова: космический мониторинг, дистанционное зондирование, природные пожары, пирогенные эмиссии, атмосферные блокирования, климатические изменения

DOI: 10.31857/S2686739720120087

ВВЕДЕНИЕ

Современные глобальные климатические изменения сопровождаются сильными региональными температурными, циркуляционными и гидрологическими аномалиями. В числе наиболее опасных последствий изменений климата — засухи и пожары. Природные пожары, в том числе лесные, степные, торфяные, оказывают значительное влияние на состояние региональных экосистем и биоразнообразие. Они существенно увеличивают содержание в атмосфере связанных с продуктами горения примесей с серьезными экологическими последствиями, негативным влиянием на здоровье населения [1, 2]. Для мониторинга и анализа последствий природных пожаров, особенно на больших территориях, наиболее

эффективно использование космических методов и технологий [3–6].

Глобальное потепление климата увеличивает риск формирования природных пожаров, в том числе в российских регионах. В частности, формированию природных пожаров на фоне температурного роста способствует тенденция уменьшения осадков в пожароопасные сезоны в среднеширотных российских регионах [7]. Длительные погодноклиматические аномалии, характеризующиеся засушливыми условиями летних сезонов в средних широтах и повышенной пожароопасностью, связаны с блокирующими антициклонами (блокинками) в тропосфере [8–10]. Влияние блокингов проявляется в региональных аномалиях с возможными значительными различиями метеорологических условий в сопредельных регионах и значительной межгодовой изменчивости. При этом существенно, что, согласно модельным оценкам, глобальное потепление приводит к увеличению вероятности более длительных атмосферных блокировок [9, 10].

В настоящем сообщении на основании данных спутникового зондирования и данных реанализа оценивается связь природных пожаров и вызываемых ими пирогенных эмиссий примесей в воз-

¹ Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва, Россия

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: mokhov@ifaran.ru



Рис. 1. Межгодовые изменения значений площадей российских пожаров, нормированных на средние значения для периода 2001–2019 гг. Прямая характеризует линейный тренд, пунктиром отмечены его 95%-ные доверительные интервалы.

душную среду с атмосферными блокировками на территории России.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При анализе использовались данные дистанционного зондирования, подробная информация о которых представлена в работе [11]. Для определения площадей природных пожаров на территории Российской Федерации и связанных с ними эмиссий в атмосферу газовых и аэрозольных примесей за период времени с 2001 по 2019 г. использовались подходы, описанные в работах [3–6]. Площади пожаров оценивались по ежедневным данным MOD14 с пространственным разрешением 1 км [12] для пожароопасных сезонов с апреля по октябрь [11]. При этом учитывался преобладающий тип почвенно-растительного покрова по данным MCD12Q1 v. 6 (MODIS Land Cover Type 500 m) согласно [13]. Всего на территории России было выделено 13 типов почвенно-растительного покрова, включая 4 класса лесного покрова, 4 класса кустарниковой, степной и луговой растительности, 2 класса сельхозугодий, 3 класса территорий, не покрытых растительностью. С использованием спутниковых данных о пожарах и данных о типах почвенно-растительного покрова оценивались объемы связанных с пожарами эмиссий в атмосферу газовых примесей (CO_2 , CO, CH_4 , NO, NO_2) и мелкодисперсных аэрозолей (PM2.5) для российских регионов [4, 5]. Ключевой вклад в эмиссии в атмосферу продуктов сгорания биомассы в результате природных пожаров связан с углеродсодержащими газовыми компонентами, в том числе CO и CO_2 [4].

В работе [11] были обновлены значения эмиссионных коэффициентов, соответствующие различным типам сгораемой растительности при определении общей эмиссии в атмосферу различных продуктов горения. Оценка объемов эмиссий

осуществлялась согласно [14] с учетом поправок [4, 6].

Наряду со спутниковыми данными для анализа региональных особенностей атмосферной циркуляции, в частности режимов блокирования (блокингов) зональной циркуляции в тропосфере средних широт, использовались данные NCEP/NCAR реанализа (<http://www.esrl.noaa.gov>). Условия формирования атмосферных блокингов определялись аналогично [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Межгодовые изменения площадей природных пожаров для территории России, нормированных на многолетнее среднее значение для периода 2001–2019 гг., представлены на рис. 1. Анализ рис. 1 показывает, что для суммарных за год площадей пожаров, обнаруженных по результатам космического мониторинга с апреля по октябрь, на фоне значительной межгодовой изменчивости проявляется тенденция уменьшения на 3.6% в год (при коэффициенте корреляции $r = 0.62$ и среднеквадратическом отклонении $\pm 2.3\%$ /год) в течение последних двух десятилетий — с начала XXI века. Средняя для периода 2001–2019 гг. площадь ежегодных пожаров в России, оцененная по данным работы [11], равнялась 200.8 тыс. км². При этом в 2003 г. площадь пожаров была примерно в 1.8 раза больше, а в 2013 и 2017 г. составляла только около 0.6 средней величины.

Отмеченная тенденция уменьшения общей площади российских пожаров сопровождается общим уменьшением суммарных эмиссий в атмосферу продуктов горения, в том числе CO_2 , CO, CH_4 , NO, NO_2 , PM2.5. При этом проявляется рост плотности (на единицу площади) пирогенных эмиссий.

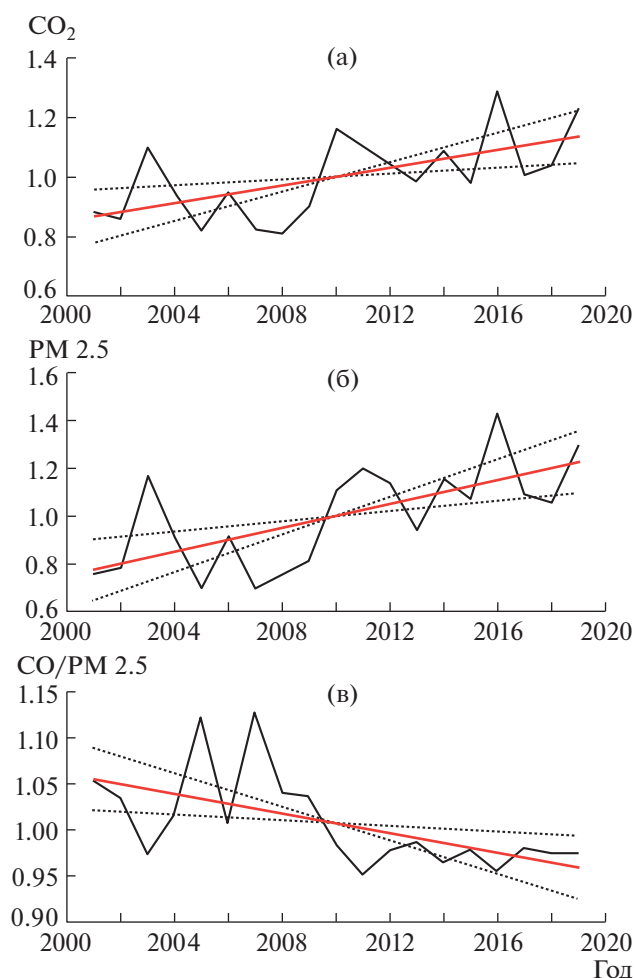


Рис. 2. Межгодовые изменения плотности эмиссий CO₂ (а) и PM_{2.5} (б), а также отношения эмиссий CO и PM_{2.5} (в). Все величины нормированы на средние значения для периода 2001–2019 гг. Прямые характеризуют соответствующие линейные тренды, пунктиром отмечены их 95%-ные доверительные интервалы.

На рис. 2 представлены межгодовые изменения нормированных плотностей эмиссий CO₂ (а) и PM_{2.5} (б), а также отношения эмиссий CO и PM_{2.5} (в). Рисунок 2а характеризует средние для пожароопасных сезонов с апреля по октябрь изменения плотности эмиссий CO₂, нормированной на среднее значение (1.8 кг/м²) для периода 2001–2019 гг., полученное по данным работы [11]. Согласно рис. 2а, проявляется тенденция увеличения средней плотности эмиссий CO₂ на 1.5%/год (при коэффициенте корреляции $r = 0.61$). При этом отмечена значительная межгодовая изменчивость с уменьшением до 20% (в 2008 г.) и увеличением до 30% (в 2016 г.) относительно средней величины.

На рис. 2б представлены соответствующие изменения плотности эмиссий мелкодисперсного аэрозоля, характеризуемого величиной PM_{2.5},

нормированной на среднее значение (11 г/м²) для периода 2001–2019 г., полученное по данным работы [11]. Анализ данных, представленных на рис. 2б, показывает, что отмечается тенденция увеличения средней плотности эмиссий мелкодисперсного аэрозоля на 2.5%/год (при коэффициенте корреляции $r = 0.66$) на фоне существенной межгодовой изменчивости с уменьшением до 30% (в 2005 и 2007 г.) и увеличением до 40% (в 2016 г.) относительно средней величины.

Аналогичная тенденция роста проявляется для изменений плотности эмиссий угарного газа, нормированной на среднее значение (94 г/м²) для периода 2001–2019 гг. [11], на 2.0% в год (при коэффициенте корреляции $r = 0.66$) на фоне существенной межгодовой изменчивости. При этом отмечается тенденция уменьшения отношения плотностей эмиссий угарного газа и мелкодисперсного аэрозоля (рис. 2в) на 2.5% в год (при коэффициенте корреляции $r = 0.66$).

Риск природных пожаров существенно возрастает в теплые сезоны в условиях блокирующих антициклонов, что проявляется в межгодовой изменчивости площадей пожаров и связанных с ними эмиссий в атмосферу продуктов сгорания. На рис. 3 представлены межгодовые изменения числа блоко-дней на территории России в пожарные периоды с апреля по октябрь, нормированных на средние значения для периода 2001–2019 гг. Блокировая активность в российских регионах характеризуется высокой межгодовой изменчивостью. Общая длительность атмосферных блокирований на территории России в рекордном по площади пожаров 2003 г. в полтора раза превышала среднюю для периода 2001–2019 гг., а в 2004 г. была в два раза меньше средней. При этом общая площадь пожаров в 2003 г. (365.5 тыс. км²) была в 2.2 больше, чем в 2004 г. (165.7 тыс. км²) [6, 11]. Общая длительность атмосферных блокирований в пожароопасный сезон в 2017 г. существенно снижалась – примерно на треть относительно среднего уровня. При этом в 2017 г. была отмечена минимальная площадь российских пожаров (на 40% меньше средней величины) [11].

На рис. 4а представлена зависимость общей за год площади природных пожаров на территории России от числа блоко-дней во время пожаров. Результаты анализа линейной регрессии показывают, что при увеличении числа блоко-дней на 10% площадь пожаров возрастает примерно на 8%, т.е. на 16 тыс. км². При этом с линейной зависимостью от общей длительности атмосферных блокирований в теплые сезоны связано 39% межгодовой дисперсии общей площади российских пожаров.

На рис. 4 представлены также зависимости от общего числа блоко-дней в пожароопасные сезоны общих эмиссий продуктов горения, в том чис-

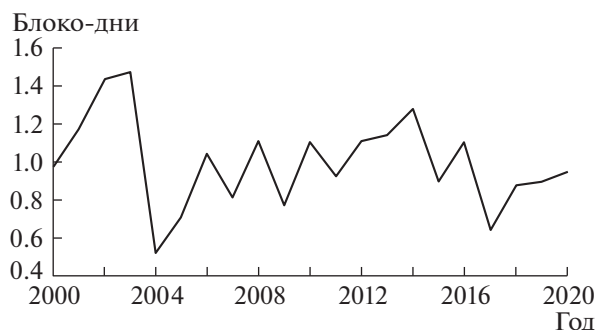


Рис. 3. Межгодовые изменения числа блокo-дней для территории России, нормированных на средние значения для периода 2001–2019 гг.

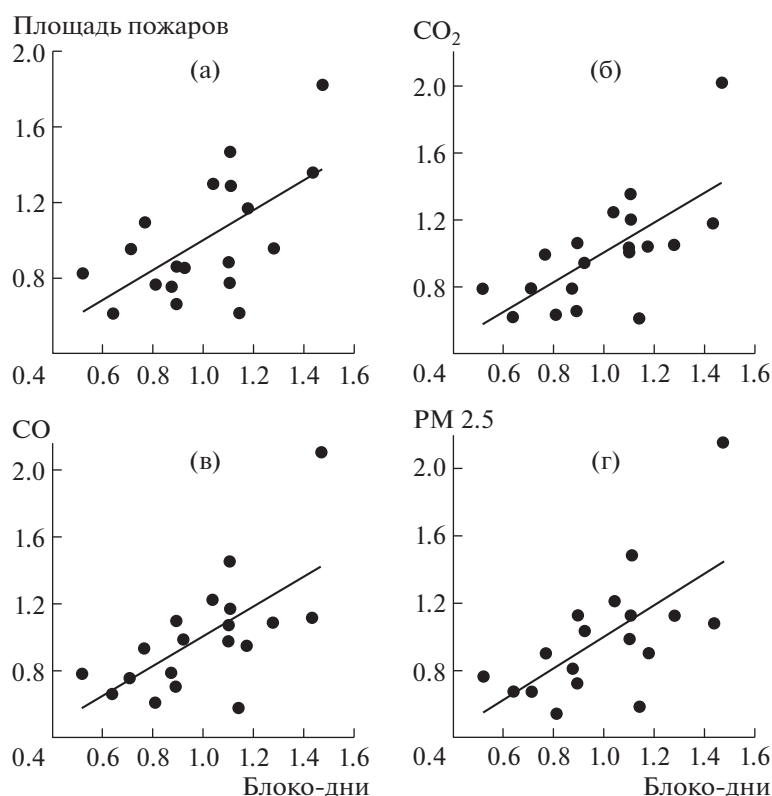


Рис. 4. Зависимость от числа блокo-дней нормированных значений общих за год площадей природных пожаров на территории России (а) и связанных с ними общих за год эмиссий в атмосферу CO_2 (б), CO (в) и $\text{PM}_{2.5}$ (г). Все величины нормированы на средние значения для периода 2001–2019 гг. Прямые соответствуют линейным регрессиям.

ле CO_2 (б), CO (в) и мелкодисперсного аэрозоля $\text{PM}_{2.5}$ (г). Согласно результатам анализа линейных регрессий (см. рис. 4), при увеличении числа блокo-дней на 10% общие эмиссии в атмосферу CO_2 , CO и мелкодисперсного аэрозоля возрастают примерно на 9%. При этом с линейной зависимостью от общей длительности атмосферных блокировок на территории России в теплые сезоны связано 39% межгодовой дисперсии общей площади пожаров, 46% межгодовой дисперсии

общей эмиссии в атмосферу CO_2 , 42% межгодовой дисперсии общей эмиссии в атмосферу CO и 43% межгодовой дисперсии общей эмиссии в атмосферу мелкодисперсного аэрозоля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют о значимой прямой связи площадей природных пожаров на территории России и вызван-

ных ими эмиссий в атмосферу продуктов горения с атмосферными блокировками.

Согласно результатам анализа данных дистанционного зондирования и данных реанализа для периода 2001–2019 гг., вклад в дисперсию межгодовых изменений площадей пожаров и потоков в атмосферу продуктов горения на территории России, связанных с атмосферными блокировками, может достигать и даже превышать 40%.

На фоне общего уменьшения площадей природных пожаров в первом 20-лети XXI века выявлена тенденция увеличения плотности эмиссий в атмосферу продуктов горения, в том числе углеродсодержащих газовых примесей CO₂, CO и мелкодисперсного аэрозоля PM_{2.5}, а также CH₄, NO, NO₂. При этом отмечена тенденция уменьшения отношения плотностей эмиссий угарного газа и аэрозоля PM_{2.5}.

В развитии полученных результатов для территории России в целом необходим дальнейший более детальный анализ региональных и внутрисезонных особенностей связи природных пожаров и их последствий с блокинговой активностью в атмосфере.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Российской Федерацией в лице Минобрнауки России (соглашение №075–15–2020–776). Анализ особенностей блокинговой активности проводился в рамках проекта РНФ (19–17–00240).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Ваганов Е.А., Сухинин А.И., Максюттов Ш.Ш., МкКалум И., Лакида И.П. Влияние природных пожаров в России 1998–2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет // ДАН. 2011. Т. 441. № 4. С. 544–548.
2. Ситнов С.А., Мохов И.И. Сравнительный анализ характеристик пожаров в бореальных лесах Евразии и северной Америки по спутниковым данным // Исследования Земли из космоса. 2018. № 2. С. 21–37.
<https://doi.org/10.7868/S0205961418020033>
3. Бондур В.Г. Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010 г. // Исследование Земли из космоса. 2011. № 3. С. 3–13.
4. Бондур В.Г. Космический мониторинг эмиссий малых газовых компонент и аэрозолей при природных пожарах в России // Исследование Земли из космоса. 2015. № 6. С. 21–35.
<https://doi.org/10.7868/S0205961415060032>
5. Бондур В.Г., Гинзбург А.С. Эмиссия углеродсодержащих газов и аэрозолей от природных пожаров на территории России по данным космического мониторинга // ДАН. 2016. Т. 466. № 4. С. 473–477.
<https://doi.org/10.7868/S0869565216040186>
6. 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 // Исследование Земли из космоса. 2016. № 6. С. 3–20.
<https://doi.org/10.7868/S0205961416060105>
7. Мохов И.И., Чернокульский А.В., Школьник И.М. Региональные модельные оценки пожароопасности при глобальных изменениях климата // ДАН. 2006. Т. 411. № 6. С. 808–811.
8. 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 // ДАН. Науки о Земле. 2020. Т. 492. № 1. С. 99–106.
<https://doi.org/10.31857/S2686739720050047>
9. Мохов И.И., Тимажеев А.В. Атмосферные блокирования и изменения их повторяемости в XXI веке по расчетам с ансамблем климатических моделей // Метеорология и гидрология. 2019. № 6. С. 5–16.
10. Мохов И.И. Российские климатические исследования в 2015–2018 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 4. С. 1–21.
<https://doi.org/10.31857/S0002351520040069>
11. Бондур В.Г., Воронова О.С., Черепанова Е.В., Цидилина Е.В., Зима А.Л. Пространственно-временной анализ многолетних природных пожаров и эмиссий вредных газов и аэрозолей в России по космическим данным // Исследование Земли из космоса. 2020. № 4. С. 3–17.
<https://doi.org/10.31857/S0205961420040028>
12. Giglio L., Schroeder W., Justice C.O. The Collection 6 MODIS Active Fire Detection Algorithm and Fire Products // Remote Sensing of Environment. V. 178. 1 June 2016. P. 31–41.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.054>
13. 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 Sensing of Environment. 2010. V. 114. P. 168–182.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.016>
14. 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. № 3. P. 207–247.
<https://doi.org/10.1007/BF00137988>
15. Tibaldi S., Molteni F. On the Operational Predictability of Blocking // Tellus. 1990. V. 42A. P. 343–365.
<https://doi.org/10.1034/j.1600-0870.1990.t01-2-00003.x>

SATELLITE MONITORING OF WILDFIRES AND ATMOSPHERIC EMISSIONS OF COMBUSTION PRODUCTS IN RUSSIA: RELATION TO ATMOSPHERIC BLOCKINGS

Academician of the RAS **I. I. Mokhov^{b,c,#}**, academician of the RAS **V. G. Bondur^a**,
S. A. Sitnov^b, and **O. S. Voronova^a**

^a *AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russian Federation*

^b *A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^c *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

[#]*e-mail: mokhov@ifaran.ru*

Using satellite data and reanalysis data, estimates of a significant relationship between the areas of natural fires and the emissions of combustion products into the atmosphere in Russia with atmospheric blockings for the period from 2001 to 2019 were obtained. It has been established that the contribution to the variance of interannual changes in the areas of fires and emissions of combustion products into the atmosphere associated with atmospheric blockings can reach and even exceed 40%. A tendency of the increase in the density of emissions of combustion products into the atmosphere, including carbon dioxide and carbon monoxide, as well as fine aerosol, against the background of a general decrease in the areas of natural fires in the first 20 years of the 21st century, is revealed. At the same time, a decrease in the ratio of pyrogenic emissions of carbon monoxide and fine aerosol was found.

Keywords: satellite monitoring, remote sensing, wildfires, pyrogenic, emissions, atmospheric blockings, climate changes