

УДК 528.88

КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПЛОЩАДЕЙ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ И ЭМИССИЙ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРУ НА ТЕРРИТОРИИ РАЗЛИЧНЫХ РЕГИОНОВ РОССИИ ЗА 20-ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

© 2021 г. Академик РАН В. Г. Бондур^{1,*}, О. С. Воронова^{1,**}, К. А. Гордо¹, А. Л. Зима¹

Поступило 14.06.2021 г.

После доработки 14.06.2021 г.

Принято к публикации 15.06.2021 г.

На основании результатов космического мониторинга проанализирована многолетняя изменчивость распределений площадей природных пожаров и вызываемых ими объемов эмиссий углеродсодержащих газовых примесей (СО, СО₂) и аэрозолей (PM_{2.5}) для крупных регионов Российской Федерации за 20-летний период (с 2001 по 2020 г.). Выявлена тенденция уменьшения площадей природных пожаров на территории Российской Федерации в целом, а также для Европейской части России и Уральского федерального округа в периоды времени с 2009 по 2020 г. и с 2012 по 2020 г. соответственно. Установлено, что вклад Сибирского федерального округа в общие объемы эмиссий СО, СО₂ и PM_{2.5} от природных пожаров был преобладающим начиная с 2011 г. Выявлено, что в 2020 г. объемы эмиссий от природных пожаров на территории Дальневосточного федерального округа превысили 55% от общероссийских.

Ключевые слова: космический мониторинг, дистанционное зондирование, природные пожары, углеродсодержащие газовые компоненты, аэрозоли, эмиссии

DOI: 10.31857/S2686739721100042

ВВЕДЕНИЕ

Природные пожары существенно влияют на состояние региональных экосистем и биоразнообразии, угрожают населенным пунктам и объектам инфраструктуры [1, 2]. Они являются важным источником поступления вредных газовых примесей и аэрозолей в атмосферу, угрожая здоровью населения и оказывая влияние на климат планеты [2–7]. Для оперативного обнаружения и анализа последствий природных пожаров, особенно на больших и труднодоступных территориях, наиболее эффективно использование космических методов и технологий [1–3, 5–10]. Развитие и практическое использование методов спутникового мониторинга пожаров и их последствий создало технологическую основу для качественного повышения уровня достоверности информации об этих опасных природных процессах на огромной территории России [2, 3, 6, 7] и ее от-

дельных регионов [1, 5, 8], а также на территориях других стран [9–12].

В настоящей работе приводятся результаты космического мониторинга изменчивости пространственно-временных распределений количества и площадей природных пожаров, а также вызываемых ими объемов эмиссий углеродсодержащих газовых примесей (СО, СО₂) и мелкодисперсных аэрозолей (PM_{2.5}) для территории Российской Федерации и ее отдельных регионов в пожароопасные периоды с апреля по октябрь за 20 лет с 2001 по 2020 г.

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Мониторинг природных пожаров и выявление изменений границ площадей, пройденных огнем, осуществлялись по методике, описанной в работах [2, 7, 9]. Данные о площадях, пройденных огнем в результате природных пожаров на исследуемых территориях, были получены с помощью спектрорадиометров MODIS, установленных на спутниках Terra и Aqua. В качестве основного использовался продукт MOD14 2-го уровня обработки с пространственным разрешением 1 км

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

*e-mail: vgbondur@aerocosmos.info

**e-mail: v_olya86@mail.ru

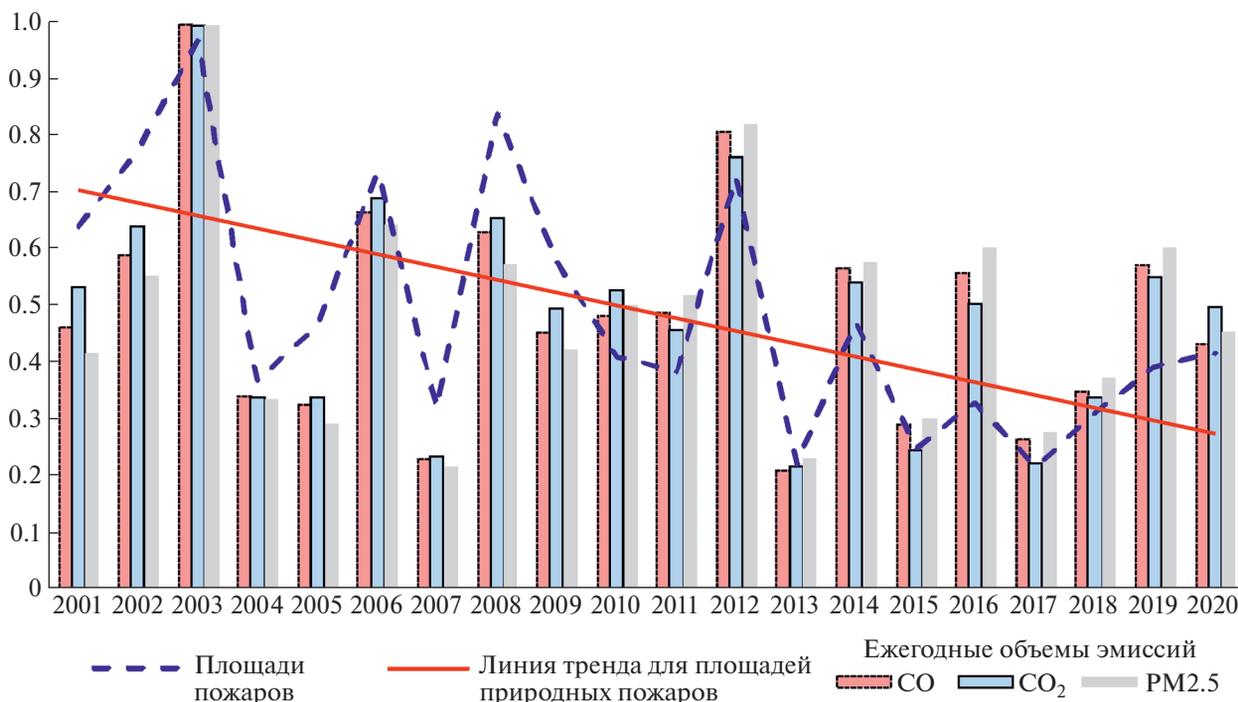


Рис. 1. Нормализованные значения ежегодных площадей природных пожаров и связанных с ними суммарных объемов эмиссий CO, CO₂ и PM_{2.5} на территории Российской Федерации для периода времени с 2001 по 2020 г. Прямая характеризует линейный тренд, пунктирной линией отмечены нормализованные значения площадей, пройденных огнем, гистограммой показаны нормализованные значения ежегодных объемов эмиссий CO, CO₂ и PM_{2.5}.

[13]. Данные обрабатывались за пожароопасный период с апреля по октябрь, характерный для России, в период времени с 2001 по 2020 г. В процессе обработки учитывалась фактически выгорающая территория за год без учета повторяемости горения одного и того же участка для пожароопасного сезона. Анализ полученных значений площадей, пройденных огнем, осуществлялся путем нормализации данных с использованием среднеквадратического отклонения данных текущего года по сравнению с данными других лет в период с 2001 по 2020 г.

Для оценки объемов эмиссий малых газовых компонент и аэрозолей от природных пожаров был применен модифицированный метод Сейлера-Крутцена [14], который учитывает площади, пройденные огнем, с введением поправочного коэффициента, полученного по данным более высокого пространственного разрешения [2, 7], а также плотность распределения биомассы на данной площади и долю сгоревшей биомассы. В настоящем исследовании была проведена оценка объемов эмиссий малых газовых компонент (CO, CO₂) и мелкодисперсных аэрозолей (PM_{2.5}) от природных пожаров в пожароопасный период для интервала времени с 2001 по 2020 г.

В ходе проведения исследований была проведена оценка ежегодной динамики плотностей и

площадей природных пожаров, а также обусловленных ими объемов эмиссий для всей территории Российской Федерации и четырех ее крупных регионов: Европейской части России (ЕЧР), а также Уральского федерального округа (УрФО), Сибирского федерального округа (СФО) и Дальневосточного федерального округа (ДФО). Это позволило оценить вклад каждого региона в общие объемы выбросов углеродсодержащих газов (CO, CO₂) и мелкодисперсных аэрозолей (PM_{2.5}) на территории Российской Федерации.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

При проведении исследований на основании результатов космического мониторинга были получены данные о распределениях площадей природных пожаров и обусловленных ими объемов эмиссий CO, CO₂ и PM_{2.5} для территорий Российской Федерации, осуществлена нормализация значений с использованием среднеквадратического отклонения данных текущего года по сравнению с данными других лет в период с 2001 по 2020 г. (рис. 1).

В результате анализа полученных данных (рис. 1) выявлена тенденция к снижению ежегодных площадей природных пожаров на территории России, однако ежегодные объемы эмиссий CO, CO₂

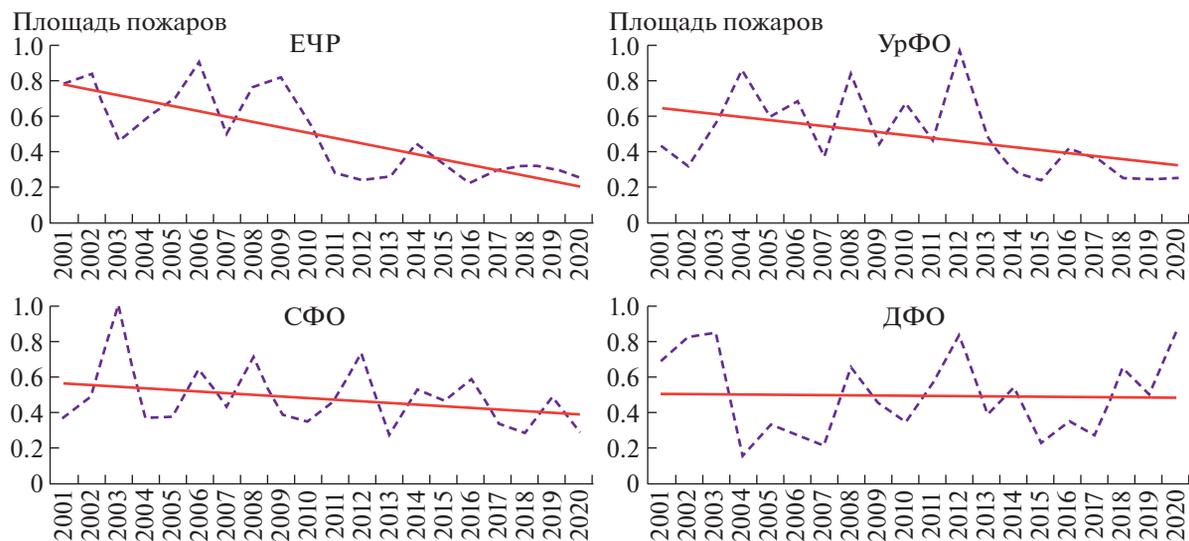


Рис. 2. Значения ежегодных площадей природных пожаров на территориях крупных регионов Российской Федерации (ЕЧР, УрФО, СФО, ДФО), нормализованные значения площадей, пройденных огнем, с использованием среднеквадратического отклонения данных текущего года по сравнению с данными других лет в период с 2001 по 2020 г.

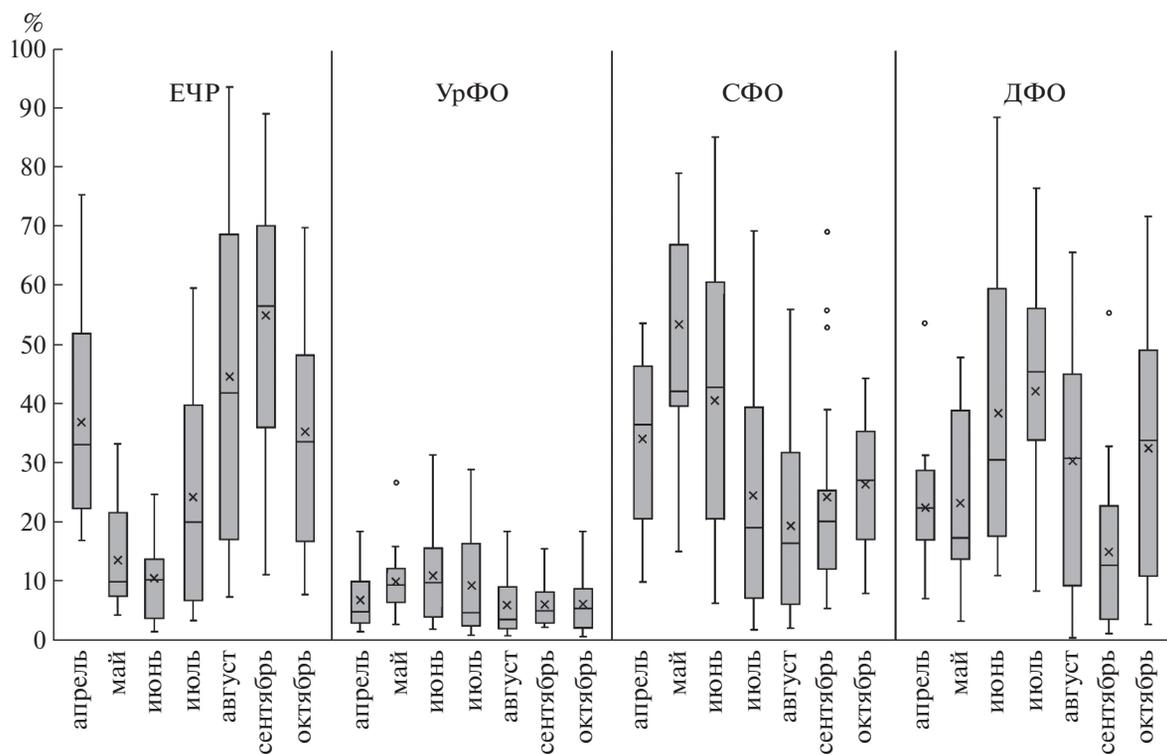


Рис. 3. Распределение площадей природных пожаров, зафиксированных на территории крупных регионов России с 2001 по 2020 г. (в период апрель-май) и представленных в процентном соотношении относительно общероссийских.

и PM_{2.5} при этом остаются достаточно высокими. Это вероятно связано с тем, что после 2010 г. значительные площади, пройденные огнем, были выявлены на территории СФО и ДФО, где основная доля выгораний приходится на леса (81%) [8].

На рис. 2 представлен результат нормализации значений площадей природных пожаров, зафиксированных в период с 2001 по 2020 г. на территории крупных регионов Российской Федерации: ЕЧР, УрФО, СФО и ДФО.

Таблица 1. Ежегодные удельные плотности очагов пожаров (количество очагов, отнесенное к общей площади региона, шт./км²) на территориях крупных регионов России с 2001 по 2020 г.

Год	Ежегодные удельные плотности очагов пожаров ($\times 10^{-3}$ шт./км ²)			
	ЕЧР	УрФО	СФО	ДФО
2001	17	6.2	6.2	12.9
2002	31.8	7.4	11.5	27.6
2003	20	20.9	63.5	30.5
2004	25.2	31.2	13.2	4.3
2005	30.3	27.1	13.4	9.8
2006	42.5	23.7	27.3	7.6
2007	20.9	16.1	17.4	5.8
2008	33.6	25.1	27.6	21.2
2009	37.1	14.1	13.9	15
2010	31.6	19.2	12.1	13.9
2011	11.2	14.6	18.9	18.7
2012	9.9	39.6	35.1	30.2
2013	10.6	18.7	13.7	14.1
2014	19.8	7.1	21.4	19.4
2015	13.7	5.8	23	7.4
2016	8.4	15.7	32.5	9.9
2017	12.7	12.6	15.4	10.4
2018	14.3	7.3	13.8	19.8
2019	13.4	7.4	33.7	20.1
2020	10.5	8.3	14	30.3

Анализ представленных на рис. 2 нормализованных значений площадей природных пожаров для 20-летнего периода времени показывает, что по результатам космического мониторинга выявлена явно выраженная тенденция к их уменьшению для территорий ЕЧР и УрФО. Для территории СФО прослеживается постепенное снижение площадей, пройденных огнем. В то же время динамика колебаний площадей территорий, пройденных огнем, для территории ДФО (рис. 2) носит циклический характер то понижаясь, то увеличиваясь с примерной периодичностью в 10 лет (2002 и 2003 г., затем 2011 и 2012 г., далее 2019 и 2020 г.). Это подтверждают и данные работы [15].

В табл. 1 представлены удельные ежегодные плотности очагов природных пожаров (количество очагов, отнесенное к общей площади региона, шт./км²), обнаруженных из космоса, для исследуемых регионов Российской Федерации в период времени с 2001 по 2020 г.

Из анализа табл. 1 следует, что наибольшее количество очагов природных пожаров на единицу площади было выявлено в 2003 г. в СФО, когда их удельная плотность составила 63.5×10^{-3} шт./км². Для территории ЕЧР выявлен характерный максимум в 2006 г. (42.5×10^{-3} шт./км²). В УрФО наибольшая удельная плотность очагов природных пожаров была обнаружена в 2012 г. и составила 39.6×10^{-3} шт./км². Для территории ДФО максимумы плотности очагов приходятся на 2003, 2012 и 2020 г.

В СФО максимум в 2006 г. (42.5×10^{-3} шт./км²). В УрФО наибольшая удельная плотность очагов природных пожаров была обнаружена в 2012 г. и составила 39.6×10^{-3} шт./км². Для территории ДФО максимумы плотности очагов приходятся на 2003, 2012 и 2020 г.

Кроме того, по полученным среднемесячным значениям площадей природных пожаров [15] было проанализировано их процентное распределение на территории крупных регионов (ЕЧР, УрФО, СФО, ДФО) относительно общероссийских в период апрель-октябрь с 2001 по 2020 г. (рис. 3).

Из анализа табл. 1 следует, что наибольшее количество очагов природных пожаров на единицу площади было выявлено в 2003 г. в СФО, когда их удельная плотность составила 63.5×10^{-3} шт./км². Для территории ЕЧР выявлен характерный максимум в 2006 г. (42.5×10^{-3} шт./км²). В УрФО наибольшая удельная плотность очагов природных пожаров была обнаружена в 2012 г. и составила 39.6×10^{-3} шт./км². Для территории ДФО максимумы плотности очагов приходятся на 2003, 2012 и 2020 г.

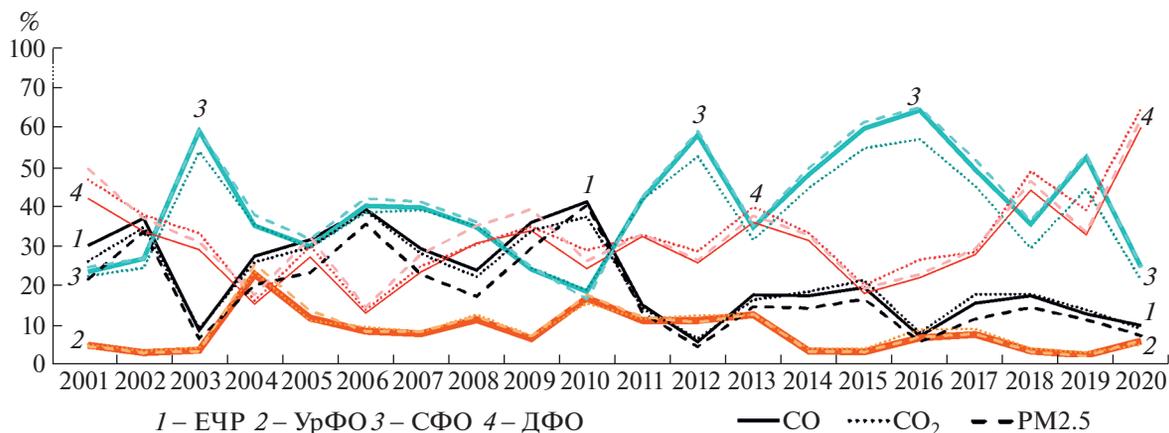


Рис. 4. Распределение вкладов объемов эмиссий CO, CO₂, PM2.5, обусловленных природными пожарами на территориях ЕЧР (1), УрФО (2), СФО (3) и ДФО (4), в общероссийские объемы эмиссий в период с 2001 по 2020 г.

В эти месяцы доля пожаров составляла за 20-летний период 60% и более от общероссийских (рис. 3). Значительная доля природных пожаров приходилась на территорию ДФО в летние месяцы (июнь, июль, август), а также в октябре. Максимальная доля пожаров, приходящаяся на территорию ДФО, зафиксирована в 2020 г. 88% – в июне, 76% – в июле и 65% – в августе, а также в октябре 2016 г. (71%).

На основании анализа ежегодных оценок объемов эмиссий углеродосодержащих примесей и мелкодисперсных аэрозолей, связанных с природными пожарами, полученных с использованием данных космического мониторинга, был исследован вклад каждого региона с оценкой изменений за 20 лет.

На рис. 4 представлен вклад регионов ЕЧР, УрФО, СФО и ДФО в общероссийские объемы эмиссий CO, CO₂ и PM2.5, обусловленные природными пожарами, в пожароопасные периоды с 2001 по 2020 г.

В результате анализа рис. 4 выявлено, что в 2010 г. вклад в эмиссии CO, CO₂ и PM2.5 для ЕЧР достигал 40% от суммарных объемов эмиссий для всей территории Российской Федерации, когда на этой территории происходили аномальные природные пожары [1]. Начиная с 2011 и до 2020 г. наблюдалось существенное снижение объемов эмиссий для территории ЕЧР до уровней 10–20% от общероссийских.

Вклад СФО в объемы эмиссий CO, CO₂ и PM2.5 был преобладающим в 2003, 2004, 2006–2008, 2011, 2012, 2014–2017, 2019 г., а в 2003, 2012, 2015, 2016 г. этот вклад достигал 60% от общероссийских.

Согласно рис. 4 наблюдалась постепенная тенденция к усилению роста влияния выбросов CO, CO₂, PM2.5 на территории ДФО, начиная с 2017 г.

Максимальный вклад ДФО в общие объемы эмиссий был выявлен в 2020 г. и составил 65% от общероссийских.

Выявленный вклад в общероссийские объемы эмиссий от регионов СФО и ДФО (рис. 4) наглядно объясняет причину превышения значений объемов эмиссий, наблюдаемую после 2010 г. на рис. 1.

Таким образом, основываясь на представленных результатах, можно сделать вывод об эффективности использования спутниковых данных и применения различных методов и средств космического мониторинга для исследования динамики природных пожаров и оценки их последствий на различных территориях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были проанализированы результаты космического мониторинга природных пожаров для территории Российской Федерации за период с 2001 по 2020 г. Проведенный анализ позволил выявить динамику пространственно-временных вариаций площадей территорий, пройденных огнем, и обусловленных ими объемов эмиссий углеродсодержащих газов (CO, CO₂) и аэрозоля (PM2.5) за прошедшие 20 лет для всей территории Российской Федерации и ее отдельных регионов. Выявлена тенденция уменьшения площадей природных пожаров на территории Российской Федерации, а также обнаружено превышение общих объемов эмиссий CO, CO₂ и PM2.5 в период с 2010 по 2020 г.

Согласно результатам анализа региональной динамики природных пожаров следует, что для территорий ЕЧР и УрФО прослеживается тенденция к снижению площадей выгоревших территорий после 2009 г. и 2012 г. соответственно.

Для территории СФО наблюдается постепенное уменьшение площадей, пройденных огнем.

Циклические распределения площадей природных пожаров характерны для территории ДФО, что, вероятно, связано с влиянием природных факторов, таких как блокирующие антициклоны, аномалии осадков, температуры. При этом максимальные значения площадей природных пожаров на территории СФО были выявлены в 2003 и 2012 г. Максимальные значения площадей природных пожаров на территории ДФО были выявлены в 2002, 2003, 2012 и 2020 г.

В ходе настоящего исследования была проведена оценка объемов эмиссий углеродсодержащих газов (СО, СО₂) и аэрозоля (PM_{2.5}) на региональном уровне. Анализ полученных результатов показал, что наибольший вклад в ежегодные объемы выбросов вносят эмиссии, обусловленные природными пожарами, происходящими на территории СФО и ДФО. Вклад данных регионов в общие объемы эмиссий в отдельные годы достигал 65%, что обусловлено особенностями растительного покрова, значительные площади которого занимают лесные территории. Сгорание лесной биомассы в свою очередь приводит к большим объемам эмиссий, в сравнении с другими типами растительности.

Таким образом, исследование многолетней динамики природных пожаров на территории Российской Федерации позволило выявить тенденции пространственно-временных распределений площадей выгоревших территорий и объемов эмиссий, обусловленных сгоранием биомассы. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности применения описанного подхода и важности использования спутниковых данных для мониторинга природных пожаров и их последствий. Продолжением полученных результатов может стать дальнейший более детальный анализ региональных и внутрисезонных особенностей, связанных с возникновением природных пожаров, в том числе оценка взаимосвязи этих явлений с различными климатическими факторами.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Минобрнауки России в рамках соглашения № 075-15-2020-776.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бондур В.Г.* Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010 г. // Исследование Земли из космоса. 2011. № 3. С. 3–13.
2. *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>
3. *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>
4. *Andreae M.O., Merlet P.* Emission of Trace Gases and Aerosols from Biomass Burning // *Glob. Biogeochem. Cycles*. 2001. V. 15. № 4. P. 955–966. <https://doi.org/10.5194/acp-19-8523-2019>
5. *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 блокировками // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 495. № 2. С. 1–5. <https://doi.org/10.31857/S2686739720120087>
6. *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.
7. *Бондур В.Г., Гордо К.А.* Космический мониторинг площадей, пройденных огнем, и объемов эмиссий вредных примесей при лесных и других природных пожарах на территории Российской Федерации // Исследование Земли из космоса. 2018. № 3. С. 41–55. <https://doi.org/10.7868/S020596141803003X>
8. *Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Черепанова Е.В.* Космический мониторинг воздействия природных пожаров на состояние различных типов растительного покрова в федеральных округах Российской Федерации // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 3. С. 13–32. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019313-32>
9. *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>
10. *Bondur V.G., Gordo K.A., Voronova O.S., Zima A.L.* Satellite Monitoring of Anomalous Wildfires in Australia // *Frontiers Earth Science*. 2021. 8:617252. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.617252>
11. *Vasileva A., Moiseenko K.* Methane Emissions from 2000 to 2011 Wildfires in Northeast Eurasia Estimated with MODIS Burned Area Data // *Atmospheric Environment*. 2013. V.71. P. 115–121. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.02.001>
12. *Wei X., Wang G., Chen T., Hagan D.F.T., Ullah W.* A Spatio-Temporal Analysis of Active Fires over China during 2003–2016 // *Remote Sens*. 2020. V. 12. P. 1787. <https://doi.org/10.3390/rs12111787>
13. *Giglio L., Schroeder W., Justice C.O.* The Collection 6 MODIS Active Fire Detection Algorithm and Fire

- Products // Remote Sensing of Environment. June 2016. V. 178. № 1. P. 31–41.
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. No. 3. P. 207–247.
15. *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 // *Исследование Земли из космоса*. 2020. № 4. С. 3–17.
<https://doi.org/10.31857/S0205961420040028>

SATELLITE MONITORING OF VARIABILITY OF WILDFIRE AREAS AND HARMFUL TRACE GAS EMISSIONS INTO THE ATMOSPHERE FOR VARIOUS REGIONS OF RUSSIA OVER A 20-YEAR PERIOD

Academician of the RAS **V. G. Bondur^{a,#}, O. S. Voronova^{a,##}, K. A. Gordo^a, and A. L. Zima^a**

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

[#]*e-mail: vgbondur@aerocosmos.info*

^{##}*e-mail: v_olya86@mail.ru*

A multiyear variability of wildfire areas and carbon-bearing trace gas (CO, CO₂) and aerosol (PM_{2.5}) emissions for large Russian regions over the 20-year period (between 2001 and 2020) has been analyzed on the base of the satellite monitoring results. A tendency towards a decrease in the areas of wildfires for the territory of the Russian Federation as a whole and for the European part of Russia and the Ural Federal District particularly is revealed for the periods of 2009–2020 and 2012–2020, respectively. It has been established that the contribution of the Siberian Federal District into total CO, CO₂, and PM_{2.5} emissions due to wildfires was prevailing since 2011. It is revealed that in 2020 the volumes of emissions due to wildfires within the Far East Federal district exceeded 55% of total emissions in Russia.

Keywords: satellite monitoring, remote sensing, wildfires, carbon-bearing gas components, aerosols, emissions