

УДК 528.8+551.5

АНОМАЛЬНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ И ЭМИССИЙ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ В ЕВРОПЕ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Академик РАН В. Г. Бондур, М. Н. Цидилина*, В. Л. Кладов, К. А. Гордо

Поступило 02.08.2018 г.

На основании результатов космического мониторинга выявлены аномалии пространственно-временных распределений очагов возгораний и площадей природных пожаров, а также объёмов вызываемых ими эмиссий углеродсодержащих газов (CO , CO_2) и мелкодисперсных аэрозолей ($\text{PM}_{2,5}$) для территории Европейской части России (ЕЧР), Восточной и Центральной Европы с 2005 по 2018 г. Установлено, что на территории ЕЧР ежегодные площади пожаров с 2005 по 2013 г. снижались почти в 10 раз, объёмы эмиссий вредных примесей в атмосферу — в 7 раз, а начиная с 2014 г. зарегистрированы их рост и стабилизация. Выявлены сезонные максимумы (весенний и летний) в распределениях площадей выгоревших территорий и объёмов эмиссий в исследуемый период времени. Аномально большое число очагов возгораний обнаружено на территории Украины с 2014 по 2018 г. (70% от всех пожаров в Восточной и Центральной Европе), где удельная плотность очагов пожаров, их относительные площади и относительные объёмы эмиссий возросли в 3–5,7 раза по сравнению с 2010–2013 гг., а по сравнению с другими территориями Восточной, Центральной Европы и ЕЧР в августе 2014–2018 гг. они возросли в 5–7,5 раза.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, природные пожары, растительный покров, спутниковые данные, космический мониторинг, эмиссии, газовые примеси.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524856745-749>

ВВЕДЕНИЕ

Природные пожары — это стихийные бедствия, угрожающие населению, лесному фонду и инфраструктуре. Они являются одним из основных источников эмиссий углеродсодержащих газовых примесей и аэрозолей в атмосферу [1–4], оказывающих влияние на изменение климата [5–7]. Поэтому важно получение достоверной оперативной информации, позволяющей предупреждать возникновение природных пожаров, оценивать их последствия и планировать мероприятия по тушению и восстановлению повреждённых территорий. Для решения этой задачи наиболее перспективным является использование методов и средств дистанционного зондирования Земли [2, 5, 6, 8–12], а также применение эффективных методов обработки больших потоков космической информации [8, 13].

Приводятся результаты космического мониторинга изменчивости пространственно-временных распределений природных пожаров и вызываемых ими объёмов эмиссий углеродсодержащих газовых примесей и аэрозолей на территории ЕЧР, Восточной и Центральной Европы в период апрель—октябрь с 2005 по 2018 г.

Научно-исследовательский институт
аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва
*E-mail: tsidilina2910@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛЬЗУЕМОЙ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

При проведении исследований использовалась система космического мониторинга НИИ “АЭРОКОСМОС” [2, 5, 9]. Её основными особенностями являются: большая частота обзора одного и того же района (от 30 до 40 раз в сутки); высокая скорость обработки информации и передача данных об обнаруженных пожарах (10 мин с момента приёма данных); точность (минимальный радиус регистрируемых очагов 5,5 м) и достоверность обнаружения (0,8–0,96); сочетание обзорной (разрешение 250–1000 м) и детальной (разрешение 2–30 м) космической информации.

Исследования проводили по следующей методике [5, 9–11]:

оперативно принимались на наземные станции, а также собирались из долговременных архивов обзорные изображения ИК- и видимого диапазонов спектра электромагнитных волн с различных космических аппаратов (TERRA, AQUA, Suomi NPP, спутники серий Метеор-М, Feng Yun и др.);

выявлялись очаги природных пожаров и рассчитывались их площади на исследуемых территориях путём регистрации из космоса радиационной тем-

пературы в спектральном диапазоне 3,5–3,7 мкм и разности радиационных температур в этом канале и в спектральном канале ~11,0 мкм;

уточнялись площади пожаров с использованием изображений среднего и высокого разрешения (спутники Landsat, Канопус и др.), а также путём расчёта нормализованного индекса гарей (Normalized Burn Ratio — NBR);

анализировались данные об аномалиях температуры и осадков за исследуемый период времени;

рассчитывались объёмы эмиссий CO, CO₂ и аэрозолей PM_{2,5} с использованием данных о площадях пожаров, а также информации о типах растительности, плотности биомассы и их свойствах на выгоревших территориях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

При исследованиях были получены данные о пространственно-временных распределениях количества и площадей природных пожаров, а также объёмов эмиссий газовых примесей CO₂, CO и мелкодисперсных аэрозолей PM_{2,5} для ЕЧР (с 2005 по 2018 г.) и для территории Восточной и Центральной Европы (с 2010 по 2018 г.)

Анализ площадей природных пожаров на территории ЕЧР, приведённых в табл. 1, позволил выявить их снижение с 2006 по 2013 г. почти в 10 раз (с 111,9 до 11,2 тыс. км²), а также тенденцию к повышению (с 21,5 до 48,8 тыс. км²) в 2014–2018 гг. Исключением явился 2016 г., когда этот показатель составил 15,0 тыс. км². Значения объёмов эмиссий CO₂, CO и PM_{2,5} от природных пожаров на территории ЕЧР (см. табл. 1) демонстрируют аналогичную закономерность: сокращение примерно в 7 раз с 2005 по 2013 г., а также рост с 2014 по 2018 г.

Был проведён также анализ распределения по месяцам площадей природных пожаров и среднемесячных отклонений от нормы значений температуры и осадков на территории ЕЧР в пожароопасный сезон (с 2013 по 2017 г.). По данным [14] тренд средних годовых температур для территории ЕЧР составлял +0,51 °C/10 лет, а наибольшая скорость потепления прослеживалась летом (около +0,9 °C/10 лет). В последнее десятилетие незначительный рост средних значений осадков наблюдался весной, а убывание — в летние месяцы (до –10%/10 лет) [14]. Анализ данных показал, что на фоне этих климатических изменений более высокие значения площадей пожаров в апреле и мае связаны в основном с сельхозпалами

Таблица 1. Площади природных пожаров и объёмы эмиссий CO₂, CO и аэрозолей PM_{2,5} на территории ЕЧР в 2005–2018 гг.

Год	Площади природных пожаров на ЕЧР, тыс. км ²	Объёмы эмиссий от природных пожаров на ЕЧР, млн т		
		CO ₂	CO	PM _{2,5}
2005	75,8	74,8	4,48	0,31
2006	111,9	149,8	8,60	0,85
2007	55,9	65,5	3,94	0,32
2008	104,7	105,6	7,02	0,49
2009	85,4	110,2	6,85	0,62
2010	25,1	41,0	2,06	0,12
2011	24,8	28,0	0,90	0,20
2012	24,3	26,8	0,69	0,20
2013	11,2	20,0	0,96	0,10
2014	21,7	29,9	1,55	0,18
2015	22,4	33,5	1,87	0,18
2016	15,0	22,7	1,39	0,10
2017	33,8	44,6	2,50	0,18
2018	26,3	42,2	2,63	0,26

и практически не зависят от погодных условий, а повышенная пожароопасность в августе и сентябре является, как правило, следствием высоких температур и пониженного количества осадков. Максимальные площади пожаров на территории ЕЧР были обнаружены в апреле и августе с 2013 по 2017 г. (4,24–9,77 и 2,7–8,25 тыс. км² соответственно), а также в мае 2017 г. (5,22 тыс. км²), в сентябре 2014, 2015 и 2017 гг. (3,72, 7,26 и 6,9 тыс. км²).

Анализ динамики распределений по годам площадей природных пожаров, а также среднесезонные аномалии температуры и осадков [7, 14] с 2010 по 2017 г. для всей территории России подтвердил в целом зависимость площадей, пройденных огнём, от погодных условий.

Анализ пространственного распределения очагов природных пожаров, обнаруженных из космоса с 2013 по 2018 г. на территории ЕЧР, Восточной и Центральной Европы, выявил аномально большое количество очагов возгорания на территории Украины с 2014 по 2018 г., которое значительно возросло по сравнению с 2013 г. и составило около 70% от числа очагов возгораний для всей территории Восточной и Центральной Европы. Удельная плотность очагов пожаров (количество очагов, отнесённое к общей площади региона, количество очагов/км²) на территории Украины составляла: в 2013 г. — $3,6 \cdot 10^{-3}$, в 2014 г. — $1,7 \cdot 10^{-2}$, в 2015 г. — $1,6 \cdot 10^{-2}$; в 2016 г. — $1 \cdot 10^{-2}$; в 2017 г. — $2,8 \cdot 10^{-2}$, в 2018 г. — $2,1 \cdot 10^{-2}$. Таким образом, в 2014–2017 гг. этот показатель возрос в 3–5 раз по сравнению с 2013 г.

Анализ суммарных значений площадей пожаров на территории ЕЧР, Восточной и Центральной Европы с 2014 по 2018 г. (рис. 1) выявил характерные максимумы в августе, а также в апреле (2017, 2018 гг.), мае (2018 г.) и сентябре (2014, 2015 и 2017 гг.). При этом наибольшие значения площадей пожаров были зарегистрированы в апреле и августе 2017 г. (14,54 и 22,6 тыс. км² соответственно),

что превысило в 1,6 раза максимальные показатели апреля 2014 г. и августа 2014 и 2015 гг.

На рис. 2 приведены относительные площади природных пожаров (отношение суммарных площадей, пройденных огнём, к площадям исследуемых регионов) на территориях Восточной и Центральной Европы, ЕЧР и Украины. Анализ рис. 2а показал, что на территории Украины в августе 2017 г. этот

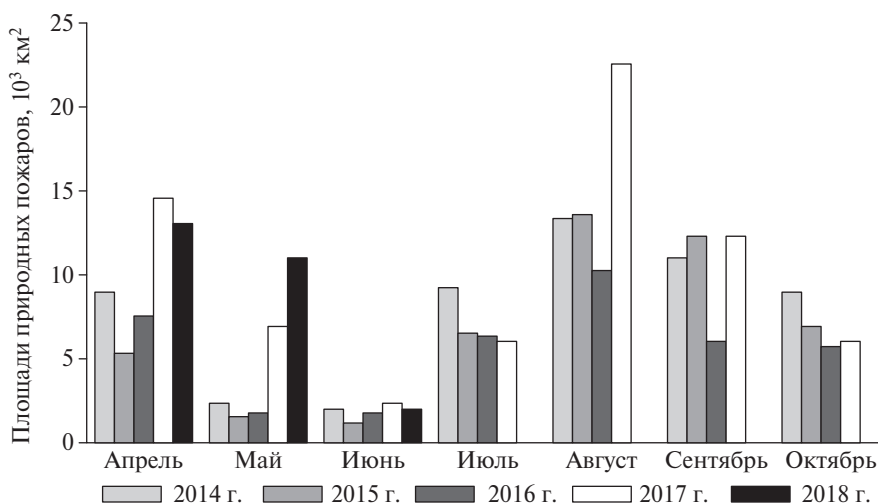


Рис. 1. Суммарные площади природных пожаров на территории ЕЧР, Восточной, Центральной Европы в 2014–2018 гг.

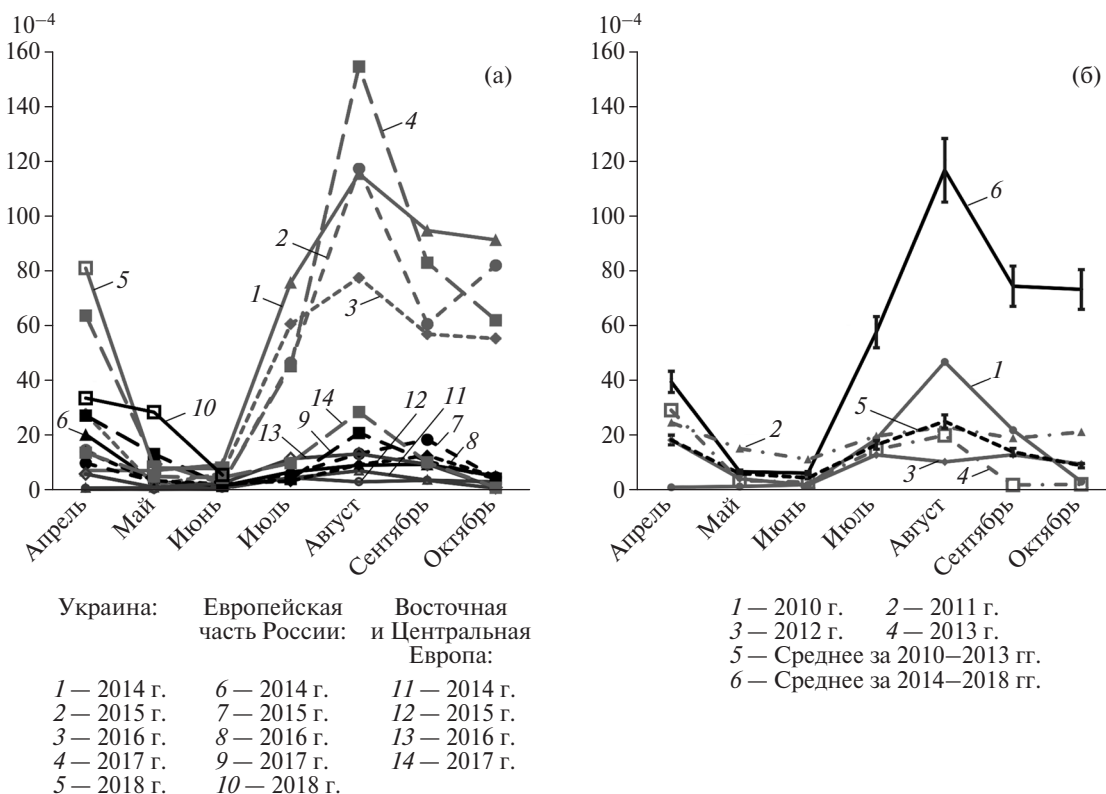


Рис. 2. Распределение по месяцам относительных площадей природных пожаров: а — на территориях Восточной, Центральной Европы, ЕЧР и Украины в 2014–2018 гг., б — на территории Украины в 2010–2013 гг. и средние значения с 2010 по 2013 и с 2014 по 2018 г.

показатель был в 7,5 раза выше, чем на остальной территории Центральной, Восточной Европы и ЕЧР. На территории Украины с 2014 по 2018 г. выгоревшие участки были в 5,7 раза больше, чем с 2010 по 2013 г. (рис. 2б). Это свидетельствует о том, что в 2014–2018 гг. в этой стране была существенно снижена эффективность мероприятий по раннему выявлению и ликвидации природных пожаров.

При проведении исследований для территории ЕЧР и Украины были рассчитаны относительные объёмы эмиссий CO_2 , CO и $\text{PM}_{2,5}$ с апреля по октябрь, а также суммарные за год с 2010 по 2018 г. (рис. 3). Анализ показал, что для территории ЕЧР максимальные относительные объёмы эмиссий выявлены: в апреле, мае, июне, сентябре и октябре 2018 г. (CO_2 — 5,71; 4,08; 1,04; 2,28 и 2,32 т/км^2 ; CO — 0,35; 0,26; 0,061; 0,138 и 0,144 т/км^2 ; $\text{PM}_{2,5}$ — 0,04; 0,02; 0,006; 0,013 и 0,013 т/км^2), в августе 2011 г. ($\text{PM}_{2,5}$ — 0,013 т/км^2), в июле и августе 2010 г. (CO_2 — 2,34 и 5,02 т/км^2 ; CO — 0,15 и 0,22 т/км^2), когда происходили anomalно сильные природные пожары [9]. Необходимо отметить, что относительные объёмы эмиссий газовых примесей с апреля по июль и в октябре 2018 г., а также в июле, августе 2010 г. превысили аналогичные показатели предыдущих лет примерно в 2 раза.

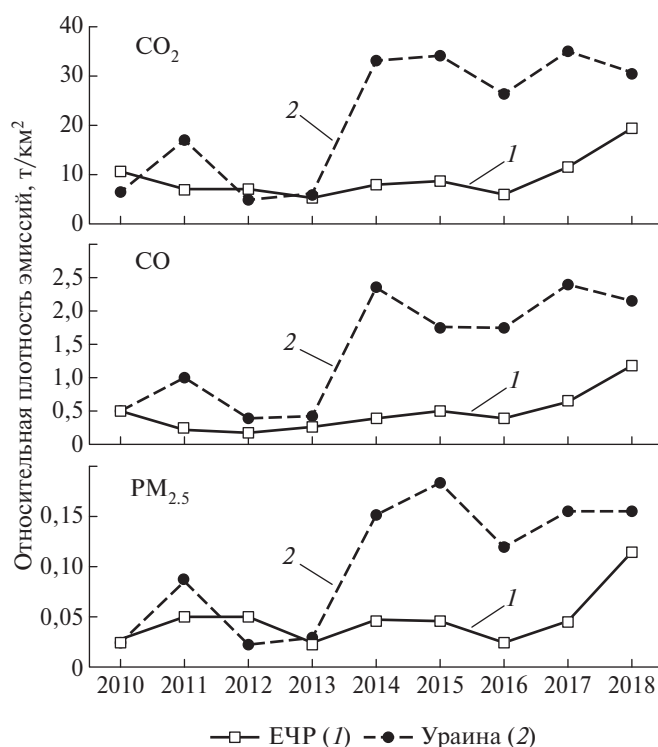


Рис. 3. Относительные объёмы эмиссий CO_2 , CO , $\text{PM}_{2,5}$, суммарные за год с 2010 по 2018 г. на территории ЕЧР (1) и Украины (2).

Анализ распределения по месяцам относительных объёмов газовых и аэрозольных эмиссий на территории Украины позволил выявить их anomalно большие значения: CO_2 — в апреле 2017, 2018 гг., августе 2015, 2017 гг., октябре 2014, 2018 гг.; CO — в апреле 2017, 2018 гг., августе 2014 и 2017 гг., октябре 2014, 2018 гг.; $\text{PM}_{2,5}$ — в апреле 2018 г. и августе 2015 г. Эти значения превышали в 3–5 раз аналогичные показатели, зарегистрированные на территории Украины в период 2010–2013 гг. Максимальные превышения суммарных за год относительных объёмов эмиссий на территории Украины по сравнению с ЕЧР (рис. 3) были зарегистрированы для CO_2 в 2014, 2015 и 2017 гг. (в 4 раза), CO в 2014, 2017 гг. (в 4–6 раз), $\text{PM}_{2,5}$ в 2015 г. (в 3 раза).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов космического мониторинга установлены закономерности пространственных и сезонных распределений числа возгораний, природных пожаров и объёмов, вызываемых ими эмиссий вредных примесей в атмосферу, для различных регионов на территории Европы. Выявлены снижение площадей пожаров и объёмов эмиссий CO_2 , CO , $\text{PM}_{2,5}$ на территории ЕЧР с 2005 по 2013 г. примерно 10 и 7 раз соответственно, их увеличение в 2014–2018 гг., а также два сезонных максимума, как правило, в апреле и августе.

Установлено anomalное увеличение на территории Украины с 2014 по 2018 г. числа очагов пожаров, их относительных площадей и относительных объёмов эмиссий вредных примесей в 3–5,7 раза по сравнению с периодом 2010–2013 гг. и в 5–7,5 раза по сравнению с другими регионами на территории Европы. Такая ситуация может быть связана с низкой эффективностью мер по раннему обнаружению и ликвидации природных пожаров.

Источник финансирования. Исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI58317X0061).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Исаев А.С., Коровин Г.Н., Сухих В.И. Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России: Аналитический обзор. М.: Центр экологической политики России, 1995. 155 с.
- Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М.: Науч. мир, 2009. 692 с.
- Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Ваганов Е.А., Сухинин А.И., Максюттов Ш.Ш., МкКалум И., Ла-

- кида И.П. Влияние природных пожаров в России 1998–2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет // ДАН. 2011. Т. 441. № 4. С. 544–548.
4. *Lappalainen H.K., et al.* Pan-Eurasian Experiment (PEEX): Towards a Holistic Understanding of the Feedbacks and Interactions in the Land–Atmosphere–Ocean–Society Continuum in the Northern Eurasian Region // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 14421–14461. DOI: 10.5194/acp-16-14421-2016.
 5. *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.
 6. *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.
 7. <http://www.meteorf.ru> Доклады об особенностях климата на территории Российской Федерации.
 8. *Савин А.И., Бондур В.Г.* Научные основы создания и диверсификации глобальных аэрокосмических систем // *Оптика атмосферы и океана.* 2000. Т. 13. № 1. С. 46–62.
 9. *Бондур В.Г.* Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010 г. // *Исслед. Земли из космоса.* 2011. № 3. С. 3–13.
 10. *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.
 11. *Бондур В.Г., Гордо К.А.* Космический мониторинг площадей, пройденных огнём, и объёмов эмиссий вредных примесей при лесных и других природных пожарах на территории Российской Федерации // *Исслед. Земли из космоса.* 2018. № 3. С. 41–55.
 12. *Bondur V.G., Gordo K.A.* Satellite Monitoring of Wildfires and Their Effects in the Northern Eurasia. 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, 29 June — 5 July, 2017. Albena, 2017. P. 227–238.
 13. *Бондур В.Г.* Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // *Исслед. Земли из космоса.* 2014. № 1. С. 4–16.
 14. <http://climatechange.igce.ru>
 15. <http://meteofr.ru>

IRREGULAR VARIABILITY OF SPATIOTEMPORAL DISTRIBUTIONS OF WILDFIRES AND EMISSIONS OF HARMFUL TRACE GASES IN EUROPE BASED ON SATELLITE MONITORING DATA

Academician of the RAS V. G. Bondur, M. N. Tsidilina, V. L. Kladov, K. A. Gordo

Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring “AEROCOSMOS”, Moscow, Russian Federation

Received August 2, 2018

Based on the results of satellite monitoring, the anomalies of spatiotemporal distributions of wildfire areas, as well as the volumes of caused emissions of carbon-containing trace gases (CO, CO₂) and aerosols (PM_{2.5}), for the territory of European Russia and Eastern and Central Europe from 2005 to 2018 are detected. It is found that, for 2005–2013, the annual areas of wildfires shrank for the territory of European Russia by almost a factor of 10, and the volumes of emissions of harmful gas traces into the atmosphere decreased by a factor of 7. However, starting from 2014, they were recorded to increase. The seasonal (spring and summer) maxima occurred in the distributions of the burned areas and the emission volumes in the time period under study. An anomalously large number of fire sources was recorded on the territory of Ukraine in 2014–2018 (70% of all fires in Eastern and Central Europe) where the specific density of fire sources, their relative areas, and the relative volumes of emissions increased by a factor of 3–5.7 compared to 2010–2013 and grew by a factor of 5–7.5 in August 2014–2018 compared to other territories of Eastern, Central Europe, and European Russia.

Keywords: remote sensing, wildfires, vegetation cover, satellite data, satellite monitoring, emissions, trace gases.