

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ДОЛГОВРЕМЕННЫЙ СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ И ЭМИССИЙ КЛИМАТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ГАЗОВ И АЭРОЗОЛЕЙ ОТ НИХ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ И ЕЕ КРУПНЫХ РЕГИОНОВ

© 2024 г. В. Г. Бондур¹*, А. Л. Зима¹, Н. В. Феоктистова¹

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

*E-mail: office@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 11.09.2024 г.

На основании результатов спутникового мониторинга исследуются различные типы природных пожаров, происходивших для четырех видов растительного покрова (леса, луга и степи, кустарники, сельскохозяйственные угодья) на всей территории Российской Федерации и территориях ее отдельных крупных регионов, в пожароопасные периоды (апрель–октябрь) с 2001 по 2023 годы. С использованием информационного продукта MCD64A1 определены площади природных пожаров и показано, что их наибольшие суммарные значения для всей территории России в исследуемый период времени, были зафиксированы в 2002, 2003 и в 2008 годах, а за последнее десятилетие их максимальное значение было зафиксировано в 2021 году и составляло 117.0 тыс. км². При этом площадь только лесных пожаров, происходивших в 2021 г. составила рекордное значение за последнее десятилетие (91.8 тыс. км²). Оценены ежегодные объемы вызываемых пожарами эмиссий углеродосодержащих климатически активных газов CO₂, CO, CH₄, и мелкодисперсных аэрозолей PM_{2.5}. Проведено сравнение полученных оценок площадей пожаров и вызванных ими эмиссий климатически активных газов с результатами других исследований. Выявлен тренд на снижение общих ежегодных значений площадей, пройденных огнем при пожарах, при постепенном росте среднегодовой радиационной мощности всех типов пожаров (FRP), происходивших на территории Российской Федерации за исследуемый 23-летний период. Сделано предположение, что это вызвано совершенствованием методов раннего выявления очагов пожаров и способов пожаротушения, которые привели к сокращению сельскохозяйственных палов и лугово-степных пожаров, прежде всего, в Европейской части России. При этом рост ежегодных средних значений радиационной мощности очагов природных пожаров, вероятно, связан с тенденциями изменений климата на огромной территории России, проявляющихся в росте температуры, а также числа и продолжительности более засушливых периодов.

Ключевые слова: спутниковые данные, космический мониторинг, природные пожары, эмиссии, климатически-активные газы, аэрозоли, растительный покров

DOI: 10.31857/S0205961424050021, **EDN:** RSGXXC

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемые в последнее время глобальные изменения климата являются серьезным вызовом для устойчивого развития нашей планеты в целом (IPCC, 2022) и Российской Федерации, в частности (Третий оценочный доклад, 2022). Такие климатические изменения проявляются различным образом: глобальное потепление, волны тепла, засухи, аномальные пожары, обильные осадки, наводнения, сокращение площади ледников, подъем уровня океана и др. (IPCC, 2022; Третий оценочный доклад, 2022). Повышение температуры и частоты засух существенно увеличивает вероятность возникновения интенсивных природных пожаров

и их быстрого распространения (Коровин, Исаев, 2000; Lappalainen et al., 2014). Природные пожары влияют на запас углерода в лесных экосистемах и, следовательно, на углеродный баланс, а также являются источниками климатически активных газов, оказывая, таким образом, значительное влияние на климат (Коровин, Исаев, 2000; Бондур, 2015; Бондур, Гинзбург, 2016; Bonan, 2008; Liu et al., 2017). Основную долю выбросов при сгорании биомассы составляют углеродсодержащие газы, прежде всего CO₂, CO, CH₄, а также мелкодисперсные аэрозоли PM_{2.5} (Швиденко и др., 2012; Liu et al., 2017).

Природный пожар — неконтролируемый процесс горения, стихийно возникающий и распро-

страняющийся в природной среде (Коровин, Исаев, 2000). Классификация природных пожаров обычно производится по объекту горения и характеру их распространения. Природные пожары подразделяются на лесные, степные и торфяные. Различают три основных вида лесных пожаров: низовые (95-97% от общего количества), верховые (1-5%) и почвенные (примерно 1%) (Залесов, 2011). В результате природных пожаров снижаются защитные, водоохранные и другие полезные свойства леса, уничтожается ценная фауна, нарушается плановое ведение лесного хозяйства и использование лесных ресурсов (Коровин, Исаев, 2000). Ослабленные пожарами насаждения становятся очагами вредных заболеваний, что приводит к гибели не только пораженных огнем, но и соседних с ними посадок (Валендик, 1979). Самый опасный вид лесных пожаров - верховые пожары с высокой скоростью распространения, когда горят кроны деревьев. При таких возгораниях деревья, охваченные огнем, чаще всего погибают. При низовых пожарах горит лесная подстилка, нижние части стволов деревьев. На площади, пройденной низовым пожаром, выживает до 90% деревьев (Курбатский, 1970).

МЧС России классифицирует пожары по объектам горения следующим образом (<https://data.rcsi.science/data-catalog/datasets/202/>): лесной — пожар, распространяющийся по залесенной территории; торфяной — пожар, при котором горит торфяной слой заболоченных и болотных почв; неконтролируемый пал — выжигание травы с нарушением требований правил пожарной безопасности; контролируемый пал — выжигание травы с участием и по предварительному согласованию с Государственной противопожарной службой.

Учитывая огромные размеры территорий, занятых лесными экосистемами в Российской Федерации, труднодоступность многих из них и, как следствие, ограниченные возможности для проведения полевых исследований, особое значение для оценки площадей, пройденных огнем при пожарах, а также объемов эмиссий климатически активных газов и мелкодисперсных аэрозолей, вызываемых ими, приобретает использование данных, получаемых при космическом мониторинге с использованием методов и средств дистанционного зондирования (Бондур, 2015; Бондур и др., 2016, 2022; Бондур, Гордо, 2018; Bondur et al., 2023; Барталев и др., 2012). Современные системы дистанционного зондирования и методы обработки космических данных позволяют получать также непрерывные оценки степени повреждения лесов пожарами (Бондур и др., 2019б; Барталев и др., 2015; Лупян и др., 2022). Существует ряд подходов, позволяющих на основании результатов космического мониторинга выяв-

лять очаги природных пожаров и проводить оценку их последствий, в том числе: анализ активных очагов горения (Hotpoints), определяемых по тепловым каналам аппаратуры ДЗЗ (Бондур, 2015; Бондур и др. 2016; Бондур, Гордо, 2018; Sukhinin et al., 2004); анализ выгоревших площадей (Burned Area), определяемых по спектрально-отражательным характеристикам растительного покрова в ближней ИК-области спектра (Giglio et al., 2015; Sukhinin et al., 2004; Барталев и др., 2012); комбинированное использование первого и второго подходов (Giglio et al., 2018); оценивать эмиссии в атмосферу Земли вредных газов и твердых частиц от различных типов пожаров (Seiler, Crutzen, 1980; Бондур, 2015; Бондур, Гинзбург, 2016; Junpen et al., 2020).

Оценки площадей природных пожаров, осуществляемые по спутниковым данным в различных исследованиях, могут значительно отличаться друг от друга. Это связано с тем, что они зависят от используемых средств дистанционного зондирования, методов и алгоритмов оценки выгоревших площадей, надежности информации о типах растительного покрова, несовпадения географических и административных границ исследуемых регионов и др. (Швиденко, Щепашенко, 2013; Бондур, Гордо, 2018; Bondur et al., 2023). Существуют также значительные расхождения и неточности в оценках площадей гарей, особенно для территории Сибири и Дальнего Востока, для которых характерна нехватка полевых данных, используемых для валидации информационных продуктов, получаемых средствами дистанционного зондирования.

Оценки объемов пожарных эмиссий, полученные по спутниковым данным различными методами, также могут значительно различаться. Результаты оценок объемов эмиссий, вызываемых природными пожарами, зависят от площадей выгоревших территорий, интенсивности пожаров (полноты сгорания биомассы), состава и других таксационных показателей лесов, типов пожаров и сезонов, когда они происходят (Seiler, Crutzen, 1980; Бондур, 2015; Бондур, Гинзбург, 2016; Junpen et al., 2020; Kharuk et al., 2021; Shi et al., 2020). Во многих научных исследованиях, например, (Пonomarev и др., 2018, Ponomarev et al., 2021, 2023; Kukavskaya et al., 2013) обычно приводятся оценки объемов эмиссий от пожаров, происходивших на территориях, покрытых бореальными лесами, так как именно такие пожары оказывают наиболее значительное влияние на глобальный углеродный бюджет. В то же время важно оценить также объемы эмиссий и от других типов природных пожаров, происходящих в других регионах.

В настоящей работе исследуются различные типы природных пожаров на четырех категориях растительного покрова (леса, сельскохозяйствен-

ные уголья, луга и степи, кустарники), которые происходили на всей территории Российской Федерации и территориях ее отдельных крупных регионов, в пожароопасные периоды (апрель – октябрь) с 2001 по 2023 годы. Приведены оценки площадей выгоревших территорий, радиационной мощности пожаров, а также объемов обусловленных ими эмиссий климатически активных углеродсодержащих газов CO_2 , CO , CH_4 и мелкодисперсных аэрозолей $\text{PM}_{2.5}$.

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛЪЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Современные системы дистанционного зондирования и методы обработки космических данных позволяют оперативно выявлять очаги природных пожаров, оценивать площади, пройденные огнем (Бондур и др., 2016, 2019а, 2022; Бондур, Гордо, 2018; Барталев и др., 2012; Giglio et al., 2015; 2018), определять степень повреждения растительного покрова (Бондур и др., 2019б; Лупян и др., 2022; Барталев и др., 2015), а также оценивать объемы эмиссий малых газовых компонент и мелкодисперсных аэрозолей в атмосферу, вызываемых этими пожарами (Бондур, 2015; Бондур, Гинзбург, 2016; Бондур и др. 2019а; Ершов, Соколова, 2022; Bonan, 2008; Liu et al., 2017).

Расчет площадей выгоревших территорий в результате природных пожаров проводится по различным спутниковым данным низкого (спутники TERRA, AQUA, NOAA, Suomi NPP, Метеор-М, FY-3 и др.), а также среднего и высокого (спутники Landsat, Sentinel-2, Канопус-В и др.) пространственного разрешения.

Получение долговременных непрерывных рядов площадей пожаров для анализа на глобальном и региональном уровнях возможно благодаря серии информационных продуктов для выгоревших территорий, сформированных по спутниковым данным с различным пространственным разрешением, таких как: EKA GLOBCARBON SPOT-ENVISAT (1 км); MODIS Burned Area MCD45, MCD64 (500 м); Copernicus PROBA-V Burnt Area (300 м); Fire CCI v5.1 MERIS/MODIS (250 м) и другие (Mouillot et al., 2014; Chu et al.; 2014).

Анализ различных информационных продуктов, используемых для обнаружения выгоревших участков растительного покрова в различных регионах России, показал, что наилучшие результаты для решения такой задачи продемонстрировали информационные продукты MCD64A1 и Fire CCI (Бондур и др., 2019б). Однако, информационный продукт MCD64A1 имеет более полный временной

охват, в то время как продукт Fire CCI версии 5.1 доступен только до 2020 года. Поэтому в настоящей работе для оценки площадей участков, выгоревших в результате природных пожаров, был выбран ежемесячный продукт MCD64A1 “Burned Area” 6-й коллекции, основанный на анализе данных, получаемых с помощью аппаратуры MODIS, установленной на спутниках Terra и Aqua (Giglio et al., 2015). Выбор данного информационного продукта основан на результатах исследования (Humber et al., 2018), в котором сравнивались продукты MCD64A1, MCD45A1, Copernicus Burnt Area и Fire CCI. В этом информационном продукте применяется гибридный алгоритм, основанный на совместном использовании данных о тепловых аномалиях и результатов измерений отражательной способности подстилающей поверхности в ближних ИК-каналах (Giglio et al., 2018).

Ввиду разнообразия типов наземных экосистем на территории России и сложности их границ, актуальным становится выбор оптимальной классификации типов растительного покрова для проведения исследований с учетом пространственных масштабов анализируемых территорий и используемых исходных данных. Существует множество систем классификации растительности, как для территории России, например, (Егоров и др., 2018), так и глобальных, например, (FAO LCCS, Global Land Cover 2000 и др.). Выбор подходящей системы классификации типов растительного покрова основан не только на требуемых пространственном разрешении и точности карт растительности, но и на регулярном их обновлении.

Тип и характеристики растительного покрова в настоящей работе определялись с использованием ежегодного продукта MCD12Q1 (MODIS Land Cover Type 500 m) 6-й коллекции с легендой на основе классификации международной геосферно – биосферной программы (IGBP) (Friedl et al., 2015), которая содержит 17 классов растительности и имеет тематическую точность в среднем 70–75%. Согласно данной классификации для территории Российской Федерации шесть классов растительности были отнесены к лесному покрову, два – к кустарниковому, один – к лугово-степному и два – к сельскохозяйственным угодьям.

В настоящей работе для каждого из этих классов растительности были рассчитаны площади, пройденные огнем при пожарах, а также оценены вызываемые ими объемы эмиссий климатически активных газов и мелкодисперсных аэрозолей с использованием соответствующих коэффициентов. Затем они объединялись в 4 основные группы пожаров по типам сгораемой растительности: лесные, кустарниковые, лугово-степные и сельскохозяйственные.

Используемая в настоящей работе методика расчета объемов пожарных эмиссий основана на модифицированной формуле Сейлера–Крутцена (Seiler, Crutzen, 1980). Она описана в работах (Бондур, 2015; Бондур, Гордо, 2018). При этом с помощью ГИС-инструментов, данные о площадях выгоревших территорий и информация о типах и свойствах растительного покрова на выгоревших участках интегрировались для расчета объемов эмиссий углеродосодержащих климатически активных газов CO_2 , CO , CH_4 и мелкодисперсных твердых частиц $\text{PM}_{2.5}$. Значения площадей пожаров определялись по спутниковым данным, а значения плотности биомассы, полноты сгорания биомассы и эмиссионные коэффициенты для каждого эмитируемого газа были получены с использованием результатов работ (Wiedinmyer et al., 2011; Akagi et al., 2011; Andreae, 2019).

Существует несколько подходов при выборе границ регионов для анализа космических данных в масштабе всей территории Российской Федерации. Они основаны на учете: административно-территориального деления, природных границ различных зон земного покрова и их комбинации. В настоящей работе для расчета площадей выгоревших территорий и оценки объемов эмиссий климатически активных углеродсодержащих газов и мелкодисперсных аэрозолей при различных типах природных пожаров, использовался подход к определению границ исследуемых территорий, основанный на административно-территориальном делении. При проведении космического мониторинга природных пожаров анализировались спутниковые данные для всей территории Российской Федерации, а также отдельно для территорий ее крупных регионов – федеральных округов (Уральский, Сибирский, Дальневосточный). При этом территории федеральных округов, расположенных в Европейской части территории России, были объединены для удобства сопоставления по масштабу с тремя указанными регионами (федеральными округами).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 1 приведены распределения значений площадей участков, выгоревших при природных пожарах на всей территории Российской Федерации за период с 2001 по 2023 год, полученные в настоящей работе по спутниковым данным с использованием информационного продукта MCD64A1.

На рис. 1а представлены распределения по годам площадей выгоревших участков для каждого месяца (показаны различными цветами) в пожа-

роопасные периоды (апрель– октябрь) за эти годы. На рис. 1б показаны распределения по годам площадей, пройденных огнем, при различных типах пожаров (выделены разными цветами: лесные – зеленым, кустарниковые – синим, лугово-степные – желтым, сельскохозяйственные палы – красным). Пунктирными столбиками на рис. 1б показаны общие площади для всех типов пожаров за каждый год в период с 2001 по 2023 гг.

Из анализа рис. 1 следует, что наибольшие суммарные значения площадей, подвергшихся воздействию природных пожаров на всей территории России в период времени с 2001 по 2023 год, были зафиксированы в 2002 г. (137.8 тыс. км²), 2003 г. (176.4 тыс. км²), 2008 г. (183.9 тыс. км²). Кроме этого, значительные площади природных пожаров были выявлены также в 2006 г. (131 тыс. км²) и в 2012 г. (125.6 тыс. км²). Это соответствует также результатам, представленным в других наших работах, например, (Бондур и др. 2022; Bondur et al., 2023).

Анализ рис. 1 показал, что за последние десять лет рекордным по площади пожаров стал 2021 год (117.0 тыс. км²), при этом площадь лесных пожаров за этот промежуток времени также была максимальной и составила 91.8 тыс. км². Следует отметить, что, как показано в работах (Бондур и др., 2022; Bondur et al. 2023), основная часть лесных пожаров, происходивших в 2021 году, была зафиксирована на территории Дальневосточного федерального округа, площадь которых составила 76.5 тыс. км².

Анализ полученных результатов показал, что за проанализированный 23-летний период времени на всей территории России средние ежегодные площади, пройденные огнем при всех типах природных пожарах, составляли 103.7 тыс. км².

Из анализа рис. 1а следует, что доля площадей участков, выгоравших в конце пожароопасного сезона (октябрь) на всей территории страны, была незначительной, в отличие от весенних месяцев (апрель, май), на которые приходилась значительная доля площадей, пройденных огнем за год, а в некоторые годы (2003, 2004, 2006, 2008, 2018 и 2023) около половины площадей пожаров. Такие высокие значения площадей участков, пройденных огнем на всей территории России в весенние месяцы, обусловлены, как правило, весенними палами травы на лугах и сельскохозяйственных угодьях. Это наглядно видно также из анализа рис. 1б, который показал, что в 2001–2009 годах были зафиксированы значительные площади пожаров на сельскохозяйственных угодьях. Исключением являлся 2003 год, когда большая доля площадей пожаров приходилась на май месяц (см. рис. 1а) и при этом преобладали лесные пожары (см. рис. 1б).

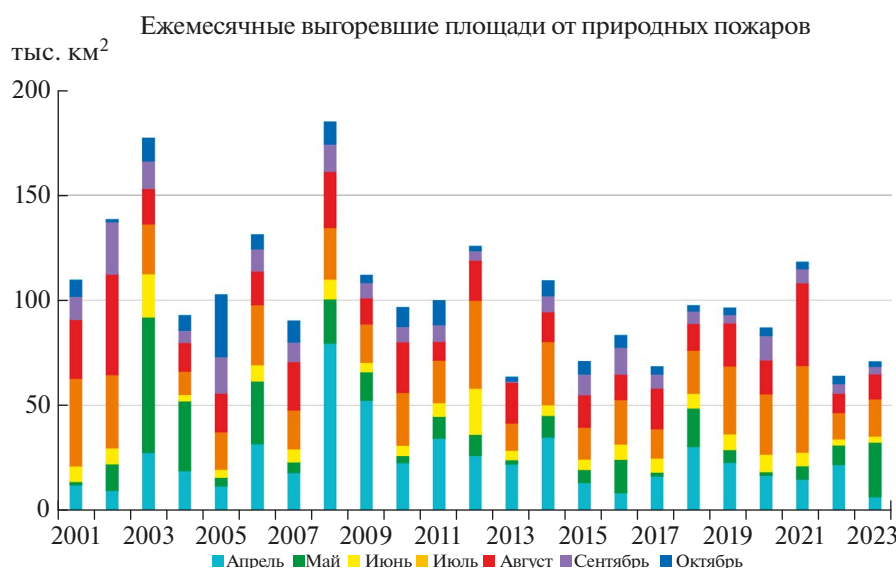
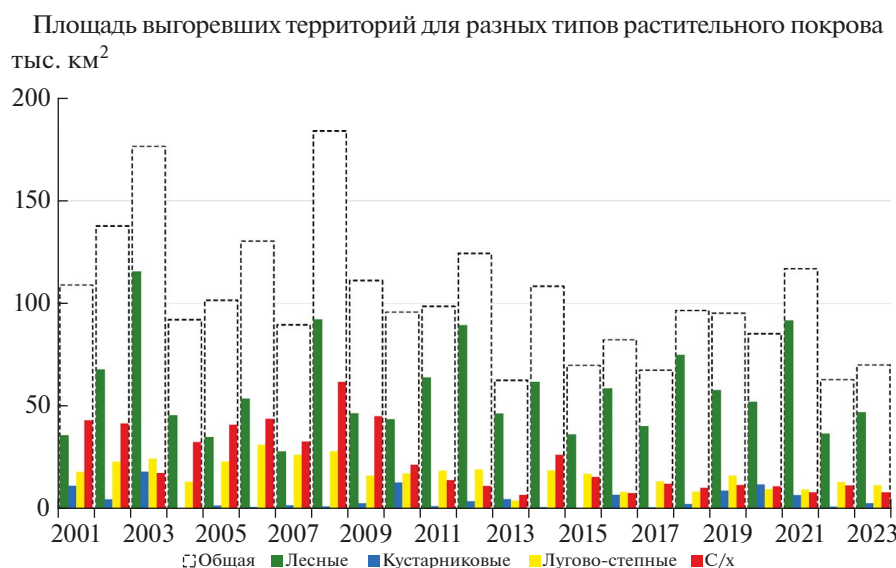
a*б*

Рис. 1. Распределения площадей участков, выгоревших от пожаров для всей территории России, полученных по данным MCD64A1 за период времени с 2001 по 2023 год: *a* - распределения по месяцам в пожароопасный период (апрель - октябрь), *б* - распределения по типам пожаров, показанных разными цветами (лесные - зеленым, кустарниковые - синим, лугово-степные - желтым, сельскохозяйственные - красным), пунктирные столбики - общие площади всех типов пожаров.

На рис. 2 приведены оценки суммарных объемов эмиссий трех углеродсодержащих климатически активных газов CO₂, CO, и CH₄, полученных в настоящей работе по спутниковым данным для четырех различных регионов Российской Федерации (Европейской части территории России (ЕЧР), Уральского (УФО), Сибирского (СФО) и Дальневосточного (ДФО) федеральных округов). Разными цветами на рис. 2 показаны вклады в суммарные объемы эмиссий этих углеродсодержащих

климатически активных газов при различных типах пожаров (лесных, кустарниковых, лугово-степных и сельскохозяйственных палов).

Как следует из анализа рис. 2б, в, г, на территориях Уральского, Сибирского и Дальневосточного регионов России преобладали эмиссии климатически активных углеродсодержащих газов от лесных пожаров. При этом анализ рис. 2б, г показал, что, начиная с 2018 г., на территориях Дальневосточного и Уральского федеральных округов выявлена

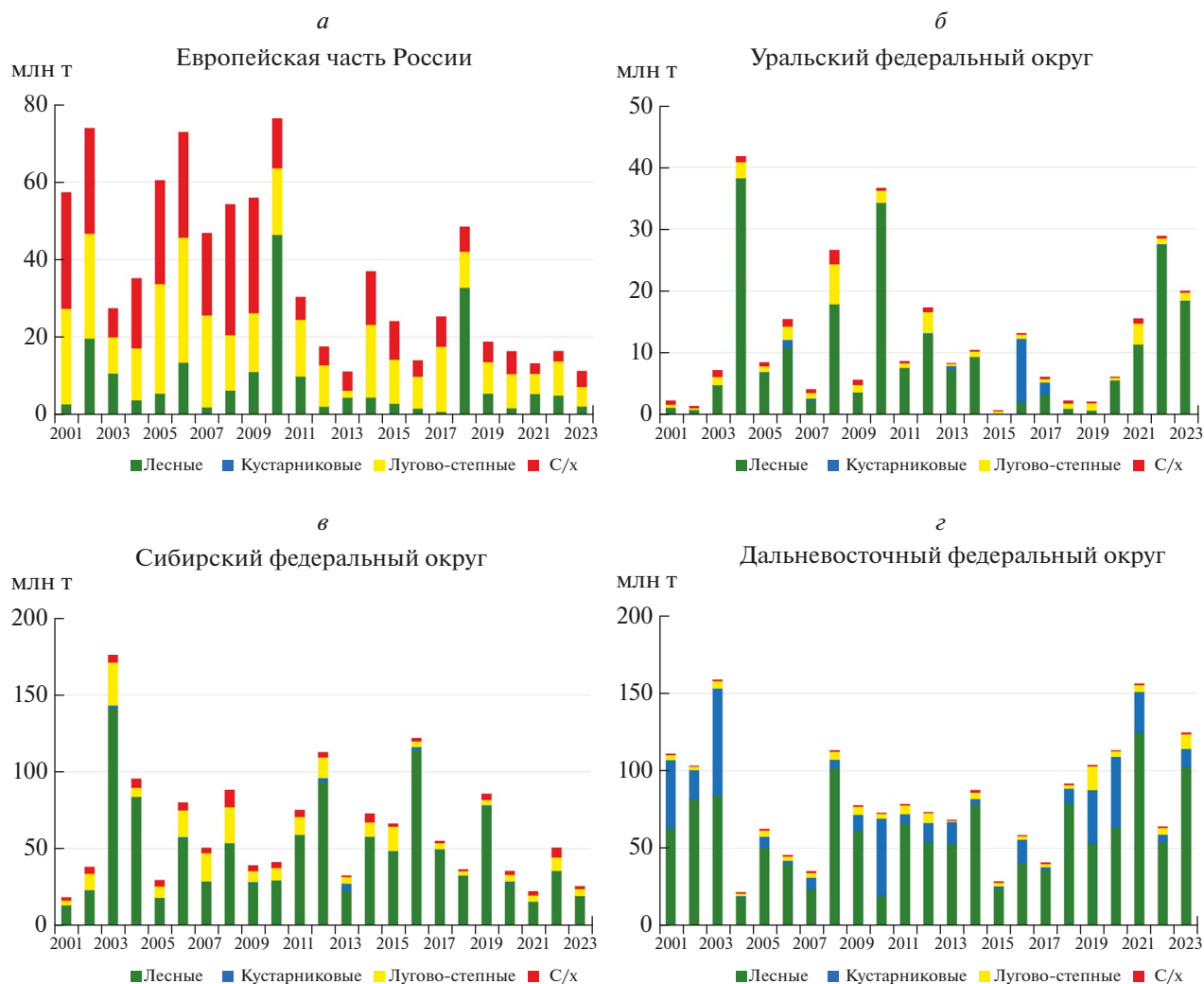


Рис. 2. Оценки ежегодных суммарных объемов эмиссий углеродсодержащих газов CO₂, CO и CH₄ при разных типах пожаров, показанных различными цветами (лесные — зеленым, кустарниковые — синим, лугово-степные — желтым, сельскохозяйственные — красным), для крупных регионов территории России: а — Европейской части России (ЕЧР), б — УФО, в — СФО, г — ДФО.

тенденция к росту объемов суммарных эмиссий углеродсодержащих газов, обусловленных лесными пожарами. Как следует из анализа рис. 2а, в, на Европейской части территории России и на территории Сибирского федерального округа проявлялась общая тенденция к снижению суммарных объемов эмиссий климатически активных углеродсодержащих газов CO₂, CO и CH₄ от всех анализируемых типов пожаров.

Анализ рис. 2 показал также, что кустарниковые пожары происходили, в основном, на территории Дальневосточного федерального округа, в зоне кустарниковой тундры (см. рис. 2г), а на территории Уральского федерального округа (см. рис. 2б) кустарниковые пожары происходили только в 2006, 2013, 2016 и 2017 годах.

Из анализа рис. 2 следует, что распределения суммарных объемов эмиссий углеродсодержащих климатически активных газов при различных типах пожаров, происходивших на Европейской части территории России (см. рис. 2а), существенно отличаются от объемов таких эмиссий для территорий других федеральных округов Российской Федерации (см. рис. 2б, в, г). Основной вклад в эмиссии углеродсодержащих климатически активных газов на Европейской части территории страны вносили лугово-степные пожары и сельскохозяйственные палы. Исключениями являлись 2010 и 2018 годы, когда на Европейской части территории России происходили аномальные лесные пожары (Бондур и др., 2016, 2022). При этом, как видно из анализа рис. 2а, после 2010 года, объемы эмиссий углеродсодержащих климатически активных газов на

Европейской части территории страны от лугово-степных пожаров и сельскохозяйственных палов значительно снизились.

Это можно проиллюстрировать на примере Краснодарского края, расположенного на юге Европейской части территории России, для которой

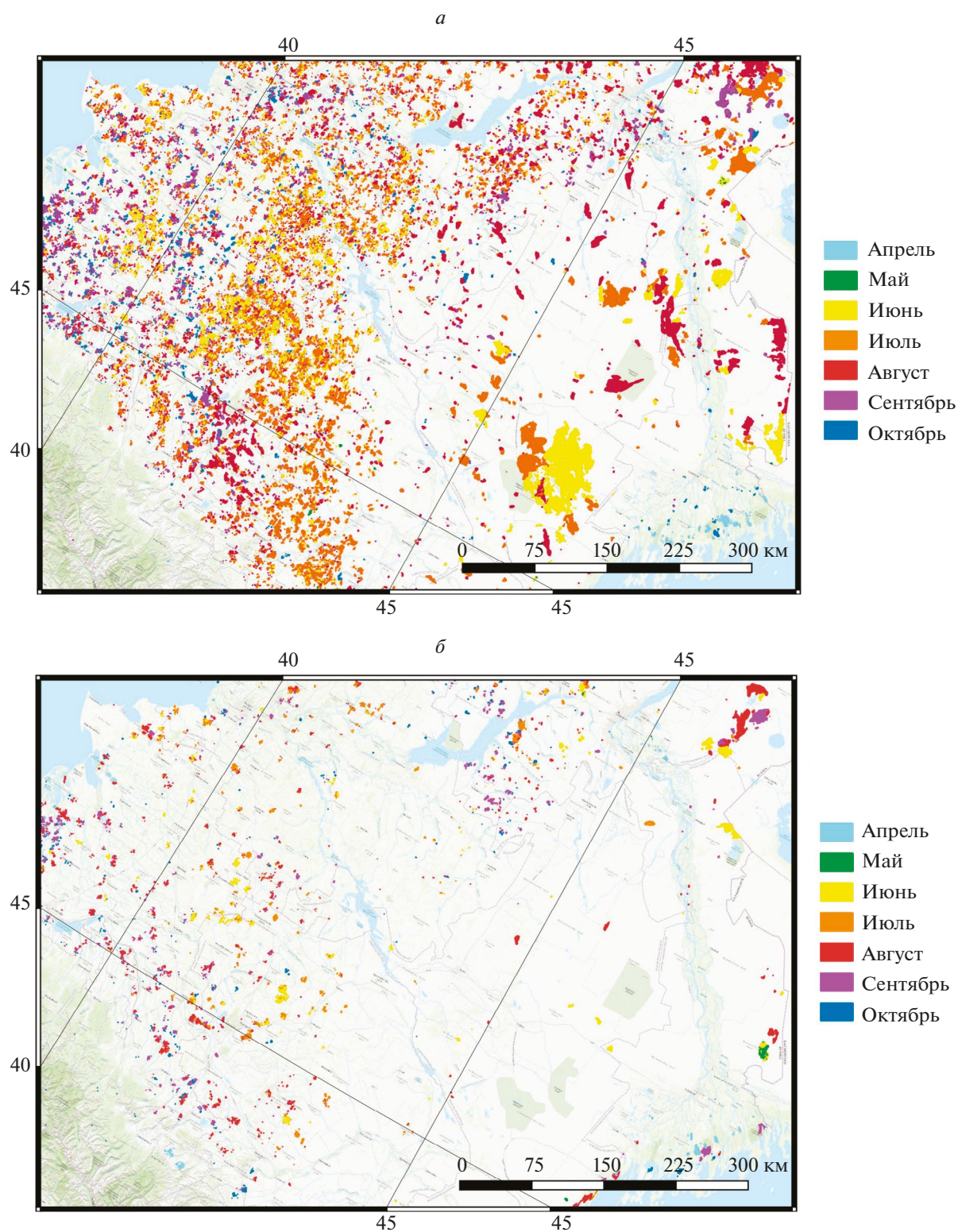


Рис. 3. Распространения площадей лугово-степных пожаров и сельскохозяйственных палов на юге Европейской части территории России в различные месяцы 2006 (а) и 2019 (б) годов.

характерно сжигание рисовой соломы на полях, повторяющееся ежегодно. На рис. 3 представлено сравнение распространения площадей лугово-степных и сельскохозяйственных пожаров на юге Европейской части территории России для различных месяцев в 2006 (рис. 3а) и в 2019 (рис. 3б) годах.

Из анализа рис. 3 видно, что во все месяцы пожароопасного периода 2019 г. на востоке этого региона (в республике Калмыкии, Астраханской и Волгоградской областях) происходило существенное уменьшение количества выгоревших участков от лугово-степных пожаров и сельскохозяйственных палов по сравнению с 2006 годом. На западе и юго-западе этого региона (на культивируемых землях Краснодарского, Ставропольского краев

и Ростовской области) во все месяцы пожароопасного периода 2019 года произошло значительное уменьшение по сравнению с 2006 годом как размеров крупных выгоревших участков в степной зоне, так и их количества при лугово-степных пожарах и сельскохозяйственных палах (см. рис. 3). Снижение количества пожаров на юге Европейской части территории России может быть связано с усилением контроля за сельскохозяйственными палами, в том числе за сжиганием рисовой соломы. В период сжигания такой соломы в Краснодарском крае неоднократно вводился режим “черного неба”. На эту проблему регулярно обращали внимание жители и экологические организации данного региона (<https://93.ru/text/gorod/2022/11/10/71806580/>).

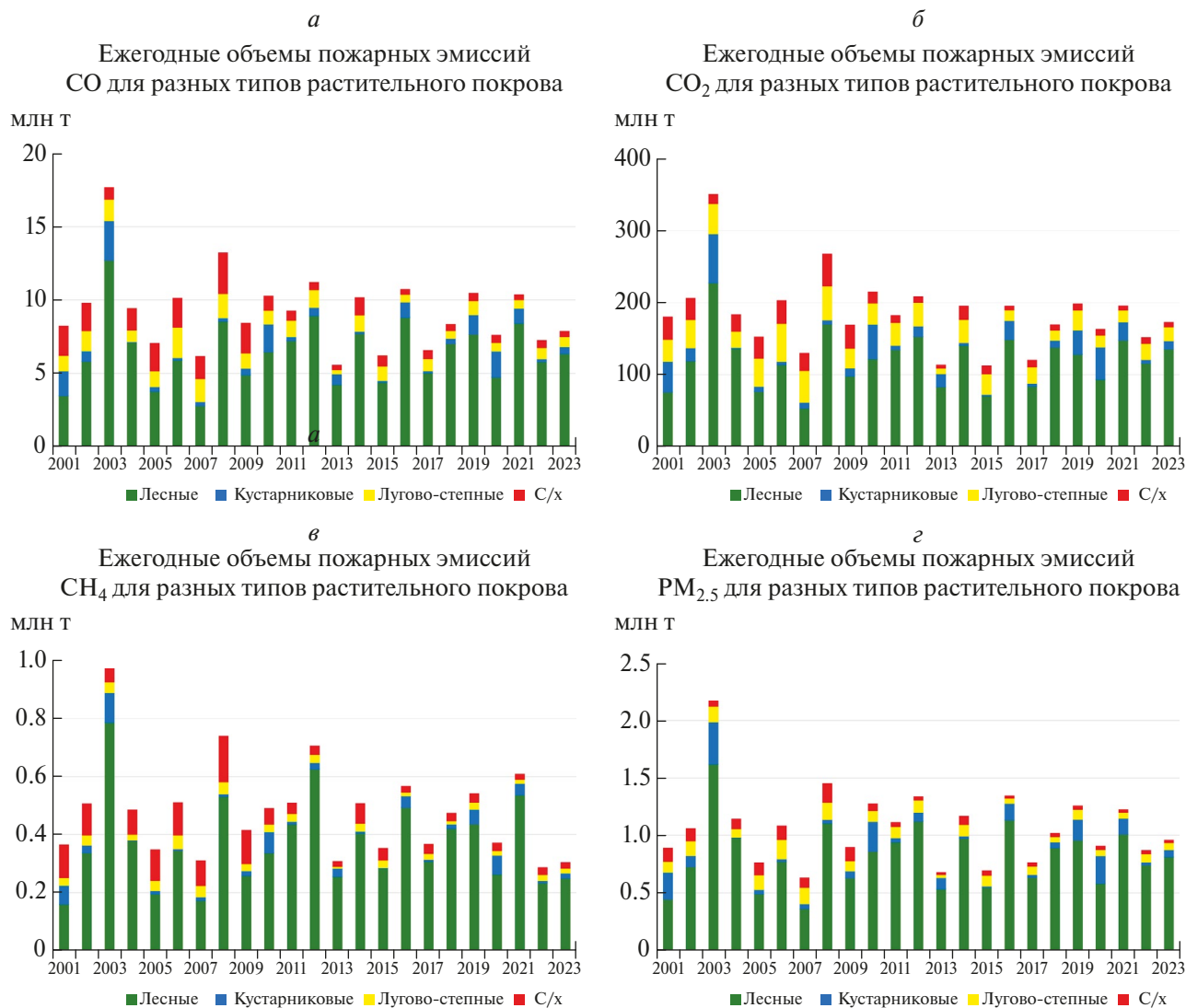


Рис. 4. Ежегодные объемы эмиссий углеродсодержащих газов CO (а), CO₂ (б), CH₄ (в) и мелкодисперсных аэрозолей PM_{2.5} (г) для разных типов пожаров, показанных разными цветами (лесные — зеленым, кустарниковые — синим, лугово-степные — желтым, сельскохозяйственные — красным) на всей территории России.

На рис. 4 приведены ежегодные объемы пожарных эмиссий отдельно для каждого из углеродсодержащих газов $\text{CO}(a)$, $\text{CO}_2(b)$, $\text{CH}_4(в)$, и мелкодисперсных аэрозолей $\text{PM}_{2.5}(г)$ для разных типов пожаров на всей территории России.

Из анализа рис. 4 следует, что объемы эмиссий CO_2 (рис.4б) существенно превышали объемы эмиссий других углеродсодержащих газов: CO (рис.4а) в 20 раз; CH_4 (рис.4в) почти в 220 раз. При этом основной вклад в ежегодные объемы пожарных эмиссий всех углеродсодержащих газов, а также аэрозолей вносили лесные пожары. В эмиссии метана (CH_4) большой вклад вносили сельскохозяйственные палы, чем лугово-степные пожары (см. рис.4г).

В таблице 1 приведены многолетние средние значения объемов эмиссий углеродсодержащих газов CO , CO_2 , CH_4 и мелкодисперсных аэрозолей $\text{PM}_{2.5}$ от пожаров, происходивших для разных типов растительного покрова на всей территории России и территориях ее отдельных регионов, полученные по спутниковым данным с 2001 по 2023 год.

Анализ результатов, полученных в настоящей работе, показал, что за последние десять лет общие объемы пожарных эмиссий для всех типов пожаров на всей территории Российской Федерации не превышали 211 млн. тонн. Это было больше среднегодового значения за весь исследуемый период времени (с 2001 по 2023 годы), составлявшего 195 млн. тонн. При этом доля пожарных эмиссий углеродсодержащих газов и мелкодисперсных аэрозолей от общего объема эмиссий, полученных в настоящей работе, составляла: для CO_2 – 94.5%; для CO – 4.5%; для CH_4 – 0.25%, а для $\text{PM}_{2.5}$ – 0.55%.

Необходимо отметить, что количественные оценки, приводимые в различных исследованиях, связанных с анализом площадей природных пожаров и объемов эмиссий углеродсодержащих газов и мелкодисперсных аэрозолей от них, могут существенно различаться в зависимости от рассматриваемых географических районов, используемой классификации растительности и временных интервалов исследования. Поэтому их сложно сопоставлять.

Таблица 1. Многолетние средние значения (2001–2023 гг.) и межгодовые стандартные отклонения объемов эмиссий углеродсодержащих газов CO , CO_2 , CH_4 и мелкодисперсных аэрозолей $\text{PM}_{2.5}$ от пожаров для разных типов растительного покрова на всей территории России и ее отдельных регионов

Регион	Параметр. млн. тонн	Тип растительного покрова				
		Лесные	Кустарниковые	Лугово-степные	С/х	Суммарные
ЕЧР	CO	0.440 ± 0.563	0.000	0.488 ± 0.266	0.804 ± 0.62	1.732 ± 1.061
	CO_2	8.216 ± 10.112	0.007 ± 0.008	13.984 ± 7.638	12.611 ± 9.68	34.818 ± 20.243
	CH_4	0.023 ± 0.029	0.000	0.012 ± 0.007	0.046 ± 0.35	0.081 ± 0.053
	$\text{PM}_{2.5}$	0.060 ± 0.078	0.000	0.045 ± 0.024	0.046 ± 0.03	0.151 ± 0.102
УФО	CO	0.487 ± 0.542	0.026 ± 0.08	0.049 ± 0.05	0.028 ± 0.027	0.590 ± 0.56
	CO_2	9.376 ± 9.928	0.656 ± 2.03	1.393 ± 1.33	0.475 ± 0.452	11.902 ± 10.57
	CH_4	0.025 ± 0.027	0.001 ± 0.003	0.001 ± 0.001	0.002 ± 0.002	0.029 ± 0.027
	$\text{PM}_{2.5}$	0.063 ± 0.072	0.004 ± 0.011	0.004 ± 0.004	0.002 ± 0.002	0.073 ± 0.073
СФО	CO	2.695 ± 1.951	0.033 ± 0.041	0.322 ± 0.227	0.196 ± 0.126	3.246 ± 2.093
	CO_2	46.180 ± 30.829	0.822 ± 1.032	9.216 ± 6.54	3.256 ± 2.052	59.475 ± 35.135
	CH_4	0.157 ± 0.119	0.001 ± 0.002	0.008 ± 0.006	0.011 ± 0.007	0.177 ± 0.124
	$\text{PM}_{2.5}$	0.347 ± 0.25	0.004 ± 0.006	0.029 ± 0.021	0.012 ± 0.007	0.393 ± 0.262
ДФО	CO	2.806 ± 1.386	0.669 ± 0.692	0.144 ± 0.102	0.031 ± 0.015	3.650 ± 1.674
	CO_2	56.728 ± 25.938	16.880 ± 17.468	4.117 ± 2.91	0.492 ± 0.24	78.218 ± 34.676
	CH_4	0.161 ± 0.092	0.026 ± 0.026	0.004 ± 0.002	0.002 ± 0.001	0.192 ± 0.099
	$\text{PM}_{2.5}$	0.350 ± 0.168	0.091 ± 0.095	0.013 ± 0.009	0.002 ± 0.001	0.457 ± 0.207
Вся территория России	CO	6.427 ± 2.196	0.728 ± 0.694	1.002 ± 0.394	1.061 ± 0.715	9.218 ± 2.581
	CO_2	120.501 ± 37.90	18.365 ± 17.519	28.711 ± 11.327	16.835 ± 11.146	184.412 ± 50.157
	CH_4	0.367 ± 0.15	0.028 ± 0.027	0.026 ± 0.010	0.060 ± 0.041	0.480 ± 0.161
	$\text{PM}_{2.5}$	0.821 ± 0.28	0.100 ± 0.095	0.092 ± 0.036	0.062 ± 0.041	1.074 ± 0.326

Полученная нами оценка объемов эмиссий CO_2 от всех типов пожаров, происходивших на всей территории России, усредненная за период времени с 2001 по 2023 год, приведенная в таблице 1, составила 184.4 ± 50.2 млн. тонн CO_2 . Это в 1.8 раза выше, чем оценка среднегодового объема пожарных эмиссий CO_2 за период с 1998 по 2010 годы, приведенная в работе (Швиденко, Щепашенко, 2013), которая составила 102 ± 24 млн. тонн. При этом, оценки среднегодовых объемов эмиссий CO и $\text{PM}_{2.5}$ от пожаров, происходивших с 1998 по 2010 годы, приведенные в работе (Швиденко, Щепашенко, 2013), составляли 9.9 ± 2.3 млн. тонн CO и 1.5 ± 0.3 млн. тонн $\text{PM}_{2.5}$ соответственно. Это близко к полученным нами оценкам, приведенным в таблице 1, которые составляли соответственно 9.218 ± 2.581 млн. тонн CO и 1.074 ± 0.326 млн. тонн $\text{PM}_{2.5}$.

Среднее за период с 2002 по 2020 год значение объема эмиссий углекислого газа CO_2 от лесных пожаров, происходивших на всей территории России, приведенное в работе (Ершов, Сочилова, 2022), составило 127.2 млн тонн CO_2 . Это несколько выше полученного нами среднего значения объема эмиссий углекислого газа только от лесных пожаров за такой же период времени, которое составило 120.83 млн. тонн CO_2 . За весь исследуемый период времени с 2001 по 2023 годы среднее значение объемов эмиссий углекислого газа CO_2 только от лесных пожаров, происходивших на всей территории России, по нашим данным составило 120.5 млн. тонн CO_2 (см. таблицу 1). Незначительное снижение среднего значения объемов эмиссий углекислого газа CO_2 только от лесных пожаров за период

времени с 2001 по 2023 годы, по сравнению со значением за период времени с 2002 по 2020 годы, связано со снижением объемов эмиссий, оцененных в 2022 и 2023 годах.

Среднее значение объема эмиссий метана CH_4 от лесных пожаров, происходивших с 2002 по 2020 годы на всей территории России, приведенное в работе (Ершов, Сочилова, 2022), составляло 0.55 млн тонн CH_4 . Наша оценка объема таких эмиссий была меньше и составила величину 0.39 млн тонн CH_4 за тот же период. Оценка среднего объема эмиссий угарного газа CO от лесных пожаров, происходивших с 2002 по 2020 годы на всей территории России, приведенная в работе (Ершов, Сочилова, 2022) составила 4.85 млн. тонн CO и была также ниже среднего значения, полученной в настоящей работе для лесных пожаров, происходивших в тот же период на всей территории России, составившей величину 6.57 млн. тонн CO .

На рис. 5 приведено более подробное сравнение оценок площадей лесных пожаров (синие столбцы) и годовых объемов эмиссий углекислого газа CO_2 (синяя линия) с 2009 по 2023 годы, полученные в настоящей работе, с данными Федерального агентства лесного хозяйства России (Рослесхоз) о площадях лесных пожаров (желтые столбцы), полученные в тот же период времени (<https://www.fedstat.ru/indicator/38496>), а также с данными о площадях лесных пожаров (зеленые столбцы) и объемах эмиссий CO_2 (зеленая пунктирная линия) за период времени с 2010 по 2020 годы, приведенные в работе (Ершов, Сочилова, 2022).

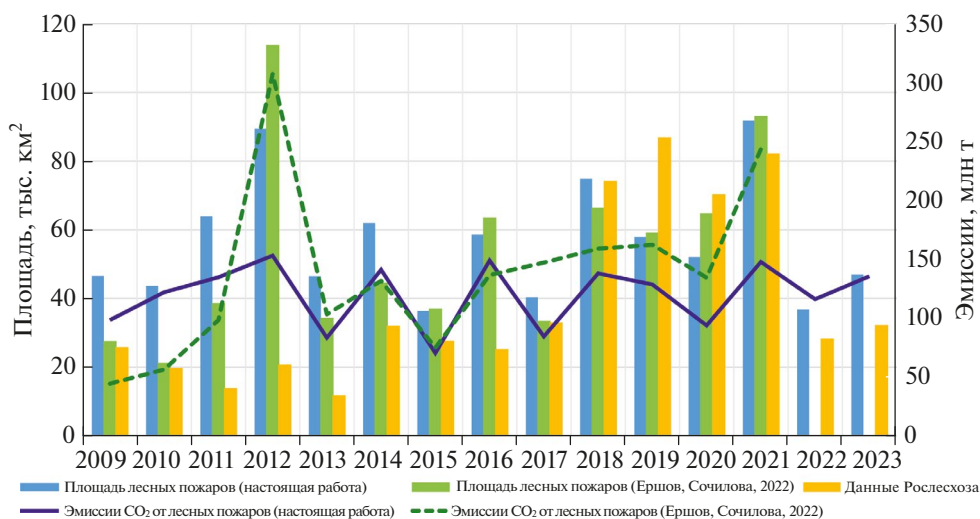


Рис. 5. Оценки площадей лесных пожаров (синие столбцы) и годовых объемов эмиссий углекислого газа CO_2 (синяя линия) с 2009 по 2023 годы, полученные в настоящей работе, данные Рослесхоза о площадях лесных пожаров (желтые столбцы), полученные в тот же период времени, данные о площадях лесных пожаров (зеленые столбцы) и объемах эмиссий CO_2 (зеленая пунктирная линия) за период времени с 2010 по 2020 годы, приведенные в работе (Ершов, Сочилова, 2022).

Как видно из анализа рис. 5, ежегодные данные о площадях пожаров на всей территории Российской Федерации, полученные в нашей работе по результатам спутникового мониторинга, и в работе (Ершов, Соколова, 2022) за период времени с 2009 по 2022 годы, отличались на 1.7–50.0%. При этом наибольшее различие, составляющее 28–52%, проявляется для данных о площадях лесных пожаров, полученных с 2009 по 2014 годы. В период времени с 2015 по 2021 годы такое различие было меньше и составляло 1.5–24%.

Сравнение ежегодных данных о площадях пожаров на землях лесного фонда, предоставляемых Рослесхозом с 2009 по 2023 годы (<https://www.fedstat.ru/indicator/38496>) и данных спутникового мониторинга, полученных в настоящем исследовании за этот период времени, а также в работе (Ершов, Соколова, 2022) за период с 2009 по 2021 годы показало, что до 2017 года оценки Рослесхоза (желтые столбцы) были значительно ниже, чем в нашей работе (синие столбцы) и в цитируемой работе (Ершов, Соколова, 2022) (зеленые столбцы). Это связано с тем, что до 2017 года в данных, предоставляемых Рослесхозом, учитывались только площади пожаров, происходивших на землях лесного фонда, где проводились меры по тушению лесных пожаров, а не на всей территории, где осуществлялся спутниковый мониторинг лесных пожаров (<https://www.fedstat.ru/indicator/58736>).

Анализ графиков, представленных на рис. 5, показывает, что оценки объемов эмиссий CO_2 от лесных пожаров, полученные нами (синяя линия) и в работе (Ершов, Соколова, 2022) (зеленая пунктирная линия), практически совпадали для периода времени с 2013 по 2016 год. Во время экстремальных лесных пожаров, происходивших в 2012 году (Бондур и др., 2016), оценки объемов пожарных эмиссий CO_2 , полученных в настоящей работе, были на 50% меньше, чем в работе (Ершов, Соко-

лова, 2022). В период времени с 2017 по 2021 годы оценки объемов пожарных эмиссий CO_2 , полученные в этой цитируемой работе были в целом выше на 13–42%, чем оценки, полученные в нашем исследовании. Это демонстрируется на рис. 5.

На рис. 6 иллюстрируется динамика ежегодных площадей всех типов пожаров, происходивших на всей территории Российской Федерации с 2001 по 2023 годы, а также ежегодных средних значений радиационной мощности пожаров (FRP), полученных с использованием спутникового информационного продукта MOD14 (Giglio, Justice, 2021), за этот период времени.

В столбцах, обозначающих площади всех типов пожаров, зеленым цветом показаны площади лесных пожаров, а желтым цветом — площади остальных типов пожаров.

Из анализа рис. 6 следует, что за период времени с 2001 по 2023 годы для всей территории России наблюдался умеренный линейный тренд (достоверность аппроксимации $R^2=0.3085$) на снижение площадей участков территорий, выгоревших при природных пожарах. Сокращение общей площади пожаров в последние годы происходило за счет значительного сокращения сельскохозяйственных палов и лугово-степных пожаров, прежде всего в Европейской части территории России, а также сокращения площадей пожаров в Сибирском федеральном округе, приводящих к таким же тенденциям изменений объемов эмиссий углеродсодержащих газов (см. рис. 2а, и 2в). При этом, площадь лесных пожаров в 2021 году была рекордной для данных, полученных после 2008 года, и составляла 91.8 тыс. км² (см. рис. 6).

В то же время из анализа рис. 6 следует, что ежегодные средние значения радиационной мощности пожаров FRP увеличивались с характерным растущим трендом. Это может быть связано с увеличени-

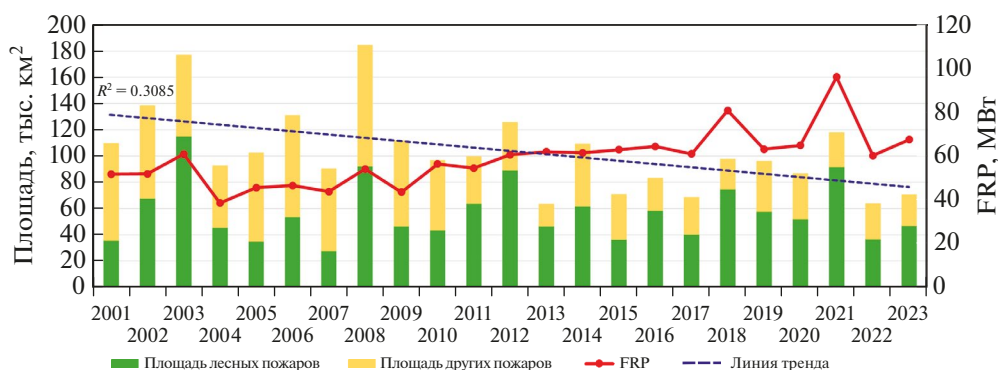


Рис. 6. Динамика ежегодных площадей пожаров (зеленый — лесные пожары, желтый — остальные типы пожаров), происходивших на всей территории Российской Федерации и ежегодных средних значений радиационной мощности пожаров (FRP) с 2001 по 2023 годы.

ем доли лесных пожаров в последние годы, прежде всего в Уральском (см. рис. 2б) и в Дальневосточном (см. рис. 2г) федеральных округах, а также их большой интенсивностью, что было отмечено также в работах (Bondur et al., 2023, Ponomarev et al., 2023).

Выявленное снижение ежегодных значений площадей, пройденных огнем, при пожарах, происходивших на всей территории Российской Федерации, может быть связано с совершенствованием методов раннего выявления очагов пожаров, а также способов пожаротушения, которые привели, прежде всего, к сокращению сельскохозяйственных палов и лугово-степных пожаров. При этом рост ежегодных средних значений радиационной мощности очагов природных пожаров, вероятно, связан с тенденциями изменений климата на огромной территории России, проявляющихся в росте температуры, преобладанием более засушливых условий (Bondur et al., 2023).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе на основе спутниковых данных получены оценки площадей различных пожаров, происходивших за длительный период времени с 2001 по 2023 год для 4-х типов растительности (лесной, кустарниковой, лугово-степной и сельскохозяйственных угодий), а также оценены ежегодные объемы эмиссий углеродсодержащих климатически активных газов CO, CO₂, CH₄ и мелкодисперсных аэрозолей PM_{2.5}. Анализ проводился для природных пожаров, происходивших на всей территории Российской Федерации и на территориях четырех крупных регионов: Европейской части России, Уральского, Сибирского и Дальневосточного федеральных округов.

Выявлены изменения ежегодно выгоравших площадей и установлено, что наибольшие суммарные значения площадей, подвергшихся воздействию природных пожаров в исследуемый период времени, определяемых по данным MCD64A1, были зафиксированы в 2002 г. (137.8 тыс. км²), 2003 г. (176.4 тыс. км²) и 2008 г. (183.9 тыс. км²). За последнее десятилетие максимальное значение выгоревшей в результате пожаров площади (117.0 тыс. км²) были зафиксировано в 2021 году, из них площадь лесных пожаров составила рекордное значение после 2008 года: 91.8 тыс. км². При этом, основная часть лесных пожаров в 2021 году происходила в Дальневосточном федеральном округе и их площадь составила максимальное для региона значение за весь период исследования — 76.5 тыс. км². Это привело к суммарному объему эмиссий углеродсодержащих климатически активных газовых компонент CO, CO₂, CH₄ более 156 млн тонн. Общий объем эмиссий климатически активных веществ при природных пожарах, рассчитанных в данной рабо-

те, для всей территории России в 2021 году составил 208.5 млн тонн, что не превысило рекордных значений таких эмиссий 2003 и 2008 годов. Среднее значение площади пожаров для всей территории страны за год составляло 103.7 тыс. км².

Распределения суммарных объемов эмиссий углеродсодержащих климатически активных газов по типам растительности сильно отличается для разных регионов. Основной вклад в эмиссии углеродсодержащих климатически активных газов на Европейской части России (ЕЧР) происходило от лугово-степных пожаров и сельскохозяйственных палов, в то время как на территориях других регионов России преобладали лесные пожары. При этом, объемы эмиссий от этих лугово-степных пожаров и сельскохозяйственных палов на ЕЧР значительно снизились после 2010 года (в среднем в 2.8 раз). Лесные пожары в этом регионе преобладали только в 2010 и 2018 годах. В последние годы для Дальневосточного и Уральского федеральных округов характерен рост эмиссий углеродсодержащих газов, обусловленных лесными и другими пожарами, в то время как на территории Сибирского федерального округа и Европейской части территории России выявлено снижение пожарных эмиссий.

В настоящей работе установлено, что за последние десять лет общие объемы пожарных эмиссий для всех типов пожаров на всей территории Российской Федерации достигали 211 млн. тонн, что было больше среднего многолетнего значения за весь исследуемый период времени (с 2001 по 2023 годы), составлявшего 195 млн. тонн. Показано, что доля пожарных эмиссий углеродсодержащих газов и мелкодисперсных аэрозолей от общего объема эмиссий составляла: для CO₂ — 94.5%; для CO — 4.5%; для CH₄ — 0.25%, а для PM_{2.5} — 0.55%.

Сравнение полученных оценок с данными других исследователей за сопоставимый период показало в целом схожую динамику изменений пожарных эмиссий. Некоторые расхождения в количественных оценках пожарных эмиссий могут быть связаны с различиями используемых классификаций растительности и методов расчета.

Анализ изменения средней ежегодной радиационной мощности пожаров (FRP), полученной по данным спутникового информационного продукта MOD14 и площадей пожаров на всей территории России показал умеренный тренд на снижение значений общих выгоревших площадей при возрастании средних значений радиационной мощности (FRP) природных пожаров. Сокращение общей площади пожаров в последние годы происходит за счет сильного сокращения сельскохозяйственных палов и лугово-степных пожаров в Европейской части России.

Рост ежегодных средних значений радиационной мощности (FRP) очагов природных пожаров, вероятно, связан с тенденциями изменений климата на огромной территории России, проявляющихся в росте температуры, преобладанием более засушливых условий. Увеличение радиационной мощности пожаров также приводит к росту объемов эмиссий углеродсодержащих газов.

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность использования данных космического мониторинга для оценки площадей природных пожаров и эмиссий климатически активных газов и аэрозолей, обусловленных ими для обширных территорий России.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в НИИ “АЭРОКОСМОС” в рамках проекта №124021200003-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Луян Е.А., Стыценко Ф.В., Флитман Е.В. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 9–27.
- Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Егоров В.А., Луян Е.А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
- 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>.
- Бондур В.Г., Гинзбург А.С. Эмиссия углеродсодержащих газов и аэрозолей от природных пожаров на территории России по данным космического мониторинга // Доклады академии наук. 2016. Т. 466. № 4. С. 473–477. <https://doi.org/10.7868/S0869565216040186>.
- 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>.
- 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>.
- Бондур В.Г., Гордо К.А., Зима А.Л. Исследование из космоса последствий природных пожаров на территории России для разных типов растительного покрова // Исследование Земли из космоса. 2022. № 6. С. 74–86. <https://doi.org/10.31857/S0205961422060033>.
- Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Кладов В.Л., Гордо К.А. Аномальная изменчивость пространственно-временных распределений природных пожаров и эмиссий вредных примесей на территории Европы по данным космического мониторинга // Доклады академии наук. 2019а. Т. 485. № 6. С. 745–749. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524856745-749>.
- 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 // Исследование Земли из космоса. 2019б. № 3. С. 13–32. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019313-32>.
- Валендик Э.Н., Матвеев П.М., Софронов М.А. Крупные лесные пожары // М.: Наука, 1979. 197 с.
- Егоров В.А., Барталев С.А., Колбудаев П.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А. Карта растительного покрова России, полученная по данным спутниковой системы Proba-V // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 282–286. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-2-282-286>.
- Ершов Д.В., Сочилова Е.Н. Количественные оценки прямых пирогенных эмиссии углерода в лесах России по данным дистанционного мониторинга 2021 года // Вопросы лесной науки, Т. 5. № 4. 2022. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202254-117>
- Залесов А.С. Классификация лесных пожаров. Методические указания по курсу “Лесная пирология”. Екатеринбург: УГЛУ, 2011. 14 с.
- Коровин Г.Н., Исаев А.С. Охрана лесов от пожаров как важнейший элемент национальной безопасности России. Лесной бюллетень. 2000. № 8–9. 121 с.
- Курбатский Н.П. Классификация лесных пожаров // Вопросы лесоведения. Красноярск, 1970. №3. С. 68–73.
- Луян Е.А., Лозин Д.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Стыценко Ф.В. Исследование зависимости степени повреждения лесов пожарами от интенсивности горения по данным спутникового мониторинга. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 217–232. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232>.
- Пономарев Е.И., Швецов Е.Г., Харук В.И. Интенсивность горения в оценке эмиссий от пожаров // Экология. 2018. № 6. С. 1–8. <https://doi.org/10.1134/S0367059718060094>.
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации // Под ред. В.М. Катцова (Росгидромет). СПб.: Научное издательство, 2022. 676 с.
- Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Ваганов Е.А., Сухинин А.И. Эмиссии парниковых газов вследствие природных пожаров в России в 1998–2012 гг. // Охрана атмосферного воздуха. Атмосфера. 2012. №1. С. 6–13.
- Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 50–61.
- 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. 11, P. 4039–4072. <https://doi.org/10.5194/acp-11-4039-2011>
- Andreae M.O. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning – an updated assessment // Atmos. Chem. Phys., 2019. 19, P. 8523–8546. <https://doi.org/10.5194/acp-19-8523-2019>
- Bonan G.B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. Science (New York, N.Y.), 2008. 320(5882). 1444–1449.

- Bondur V.G., Gordo K.A., Voronova O.S., Zima A.L., Feoktistova N.V. Intense Wildfires in Russia over a 22-Year Period According to Satellite Data. *Fire* 2023, 6, 99. <https://doi.org/10.3390/fire6030099>
- Chu T., Guo X. Remote Sensing Techniques in Monitoring Post-Fire Effects and Patterns of Forest Recovery in Boreal Forest Regions: A Review // *Remote Sens.* 2014. Vol. 6. P. 470–520. <https://doi.org/10.3390/rs6010470>.
- Friedl M., Sulla-Menashe D. MCD12Q1 MODIS/ Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006 (Data set) // NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2015. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12Q1.006>.
- Giglio L., Boschetti L., Roy D.P., Humber M.L., Justice C.O. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product // *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 217. P. 72–85. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.005>.
- Giglio L., Justice C. MODIS/Terra Thermal Anomalies/Fire 5-Min L2 Swath 1km V061 (Data set) // NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. 2021. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD14.061>.
- Giglio L., Justice C., Boschetti L., Roy D. MCD64A1 MODIS/ Terra+Aqua Burned Area Monthly L3 Global 500m SIN Grid V006 (Data set) // NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2015. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD64A1.006>.
- Humber M.L., Boschetti L., Giglio L., Justice C.O. Spatial and temporal intercomparison of four global burned area products // *International Journal of Digital Earth*. 2018. Vol. 12. No. 4. P. 460–484. <https://doi.org/10.1080/17538947.2018.1433727>.
- Junpen A., Roemmontri J., Boonman A., Cheewaphongphan P., Thao P.T.B., Garivait S. Spatial and temporal distribution of biomass open burning emissions in the greater mekong subregion // *Climate* 2020, 8, 90. <https://doi.org/10.3390/cli8080090>
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. 3056 pp. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
- Kharuk V.I., Ponomarev E.I., Ivanova G.A. et al. Wildfires in the Siberian taiga // *Ambio*. 2021. Vol. 50, P.1953–1974. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>
- Kukavskaya E., Soja A., Petkov A. Ponomarev E., Ivanova G., Conard G.S. Fire emissions estimates in Siberia: evaluation of uncertainties in area burned, land cover, and fuel consumption // *Can. J. Forest Res.* 2013. Vol. 43. No. 5. P. 493–506. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2012-0367>.
- Lappalainen H., Petäjä T., Kujansuu J., Kerminen V., Skorokhod A., Kasimov N., Bondur V. et al. Pan Eurasian Experiment (PEEX) – a research initiative meeting the grand challenges of the changing environment of the northern pan-eurasian arctic-boreal areas // *Geography. Environment. Sustainability*. 2014. Vol. 7. No. 2. P. 13–48. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2014-7-2-13-48>.
- Liu W., Lu F., Luo Y. et al. Human influence on the temporal dynamics and spatial distribution of forest biomass carbon in China // *Ecol Evol.* 2017; 7: P. 6220–6230. <https://doi.org/10.1002/ece3.3188>
- Mouillot F., Schultz M.G., Yue C., Cadule P., Tansey K., Ciais P., Chuvieco E. Ten Years of Global Burned Area Products from Spaceborne Remote Sensing – A Review: Analysis of User Needs and Recommendations for Future Developments // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2014. Vol. 26. P. 64–79 <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.05.014>.
- Ponomarev E.I.; Yakimov N.D.; Ponomareva T.V.; Yakubailik O.E.; Conard S.G. Current Trend of Carbon Emissions from Wildfires in Siberia // *Atmosphere* 2021, 12, 559 pp. <https://doi.org/10.3390/atmos12050559>
- Ponomarev E.I.; Zabrodin A.N.; Shvetsov E.G.; Ponomareva T.V. Wildfire Intensity and Fire Emissions in Siberia // *Fire*. 2023. Vol. 6. No. 7. 246 pp. <https://doi.org/10.3390/fire6070246>.
- Seiler W., Crutzen P.J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere from biomass burning // *Clim. Change*. 1980. Vol. 2. No. 3. P. 207–247
- Shi Y., Zang S., Matsunaga T., Yamaguchi Y. A multiyear and high-resolution inventory of biomass burning emissions in tropical continents from 2001–2017 based on satellite observations // *J. Cleaner Production*. 2020. 270, 122511. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122511>
- Sukhinin A.I., French N.H.F., Kasischke E.S., Hewson J.H., Soja A.J., Csiszar I.A., Hyer E.J., Loboda T., Conrad S.G., Romasko V.I., Pavlichenko E.A., Miskiv S.I., Slinkina O.A. AVHRR-based mapping of fires in Russia: New products for fire management and carbon cycle studies // *Remote Sensing of Environment*. v. 93 (2004). pp. 546 – 564.
- 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.*, 4, 625–641. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-625-2011>

Long-Term Satellite Monitoring of Various Types of Wildfires and Wildfire-Induced Emissions of Climate-Active Gases and Aerosols in Russia and in Its Large Regions

V. G. Bondur¹, A. L. Zima¹, N. V. Feoktistova¹

¹AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

Satellite monitoring results were used to study various types of wildfires that affected four vegetation types (forests, grasslands, shrubs, and agricultural areas) over the whole territory of the Russian Federation and its large regions individually in fire seasons (April - October) in 2001–2023. MCD64A1 information product was used to determine wildfire areas. The largest total values of wildfire areas for the entire territory of Russia during the studied period were recorded in 2002, 2003, and 2008, and over the past decade their maximum value was recorded in 2021, amounting to 117.0 thousand km². Notably, the area of forest fires alone in 2021 reached

a record value of 91.8 thousand km². Annual fire-induced emissions of carbon-bearing climate-active gases CO, CO₂, and CH₄, and fine aerosols PM_{2.5} were estimated. The obtained estimates of fire areas and the fire-induced emissions of climate-active gases were compared with the results of other studies. A trend to reduced values of the total annual burned-out areas, as well as a progressive increase in the average annual fire radiation power (FRP) of all fire types that occurred in Russia during the studied 23-year period, were identified. It has been suggested that this is due to improvements in early fire detection and firefighting techniques, which have reduced the number of grassland fires and agricultural burnings, mostly in Russia's European part. While the increase in annual average values of radiation power of hot spots is probably associated with climate change over the vast territory of Russia, manifested in an increase in temperature as well as the number and duration of dry periods.

Keywords: satellite data, satellite monitoring, wildfires, emissions, climate-active gases, aerosols, vegetation

REFERENCES

- 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. 11, P. 4039–4072. <https://doi.org/10.5194/acp-11-4039-2011>
- Andreae M.O. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning – an updated assessment // *Atmos. Chem. Phys.*, 2019. 19, P. 8523–8546. <https://doi.org/10.5194/acp-19-8523-2019>
- Bartalev S.A., Yegorov V.A., Yefremov V.Yu., Lupyan Ye.A., Stytsenko F.V., Flitman Ye.V. Otsenka ploshchadi pozharov na osnove kompleksirovaniya sputnikovykh dannykh raznogo prostranstvennogo razresheniya MODIS i Landsat-TM/ETM+ (Integrated burnt area assessment based on combine use of multi-resolution MODIS and Landsat-TM/ETM+ satellite data) // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012. V. 9. № 2. P. 9–27. (in Russian)
- Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Egorov V.A., Lupyan Ye.A. Sputnikovaya otsenka ushcherba ot lesnykh pozharov v Rossii (Satellite-based assessment of Russian forest fire mortality) // *Lesovedeniye*. 2015. V. 2. P. 83–94. (in Russian)
- Bonan G.B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. Science (New York, N.Y.), 2008. 320(5882). P.1444–1449.
- Bondur V.G. Satellite monitoring of trace gas and aerosol emissions during wildfires in Russia // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. Vol. 52. No. 9. P. 1078–1091. <https://doi.org/10.1134/S0001433816090103>.
- Bondur V.G., Ginzburg A.S. Emission of Carbon-Bearing Gases and Aerosols from Natural Fires on the Territory of Russia Based on Space Monitoring // *Doklady Earth Sciences*. 2016. Vol. 466. No. 2. P. 148–152. <https://doi.org/10.1134/S1028334X16020045>.
- Bondur V.G., Gordo K.A. Satellite monitoring of burnt-out areas and emissions of harmful contaminants due to forest and other wildfires in Russia // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018, Vol. 54, No. 9, P. 955–965. <https://doi.org/10.1134/S0001433818090104>
- Bondur V.G., Gordo K.A., Kladov V.L. Spacetime distributions of wildfire areas and emissions of carbon-containing gases and aerosols in northern Eurasia according to satellite-monitoring data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2017, Vol. 53, No. 9, pp. 859–874. <https://doi.org/10.1134/S0001433817090055>
- Bondur V.G., Gordo K.A., Voronova O.S., Zima A.L., Feoktistova N.V. Intense Wildfires in Russia over a 22-Year Period According to Satellite Data. *Fire*, 2023, 6, 99. <https://doi.org/10.3390/fire6030099>
- Bondur V.G., Gordo K.A., Zima A.L. Satellite Research of the Effects of Wildfires on Various Vegetation-Cover Types in Russia // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2022, Vol. 58, No. 12, pp. 1570–1580. <https://doi.org/10.1134/S0001433822120076>.
- Bondur V.G., Tsivilina M.N., Kladov V.L., Gordo K.A. Irregular Variability of Spatiotemporal Distributions of Wildfires and Emissions of Harmful Trace Gases in Europe Based on Satellite Monitoring Data // *Doklady Earth Sciences*, 2019a, Vol. 485, Part 2, pp. 461–464. <https://doi.org/10.1134/S1028334X19040202>
- Bondur V.G., Tsivilina M.N., Cherepanova E.V. Satellite monitoring of wildfire impacts on the conditions of various types of vegetation cover in the federal districts of the Russian Federation // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019b. Vol. 55. No. 9. P.1238–1253. <https://doi.org/10.1134/S000143381909010X>
- Chu T., Guo X. Remote Sensing Techniques in Monitoring Post-Fire Effects and Patterns of Forest Recovery in Boreal Forest Regions: A Review // *Remote Sens.* 2014. Vol. 6. P. 470– 520. <https://doi.org/10.3390/rs6010470>.
- Egorov V.A., Bartalev S.A., Kolbudaev P.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A. Land cover map of Russia derived from Proba-V satellite data. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. V.15. P. 282–286. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-2-282-286>.
- Ershov D.V., Sochilova E.N. Assessment of direct pyrogenic carbon emissions in forests of Russia for 2020 according to remote monitoring data // *Forest science issues*. 2020. 4. 1–8. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-8>.
- Friedl M., Sulla-Menashe D. MCD12Q1 MODIS/ Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006 (Data set) // NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2015. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12Q1.006>.
- Giglio L., Boschetti L., Roy D.P., Humber M.L., Justice C.O. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product // *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 217. P. 72–85. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.005>.
- Giglio L., Justice C. MODIS/Terra Thermal Anomalies/Fire 5–Min L2 Swath 1km V061 (Data set) // NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. 2021. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD14.061>.

- Giglio L., Justice C., Boschetti L., Roy D. MCD64A1 MODIS/Terra+Aqua Burned Area Monthly L3 Global 500m SIN Grid V006 (Data set) // NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2015. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD64A1.006>.
- Humber M.L., Boschetti L., Giglio L., Justice C.O. Spatial and temporal intercomparison of four global burned area products // International Journal of Digital Earth. 2018. Vol. 12. No. 4. P. 460–484. <https://doi.org/10.1080/17538947.2018.1433727>.
- Junpen A., Roemmontri J., Boonman A., Cheewaphongphan P., Thao P.T.B., Garivait S. Spatial and temporal distribution of biomass open burning emissions in the greater mekong subregion. Climate 2020, 8, 90. <https://doi.org/10.3390/cli808090>
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. 3056 pp. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
- Kharuk V.I., Ponomarev E.I., Ivanova G.A. et al. Wildfires in the Siberian taiga // Ambio. 2021. Vol. 50, P.1953–1974. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>
- Korovin G.N., Isaev A.S. Okhrana lesov ot pozharov kak vazhnyy element natsional'noy bezopasnosti Rossii (Protection of forests from fires as the most important element of Russia's national security) // Lesnoy vestnik. 2000. № 8-9. 121 p. (in Russian)
- Kurbatsky N.P. Klassifikatsiya lesnykh pozharov (Classification of forest fires) // Voprosy lesnogo khozyaystva. Krasnoyarsk, 1970. No. 3. P. 68-73. (in Russian)
- Kukavskaya E., Soja A., Petkov A. Ponomarev E., Ivanova G., Conard G. S. Fire emissions estimates in Siberia: evaluation of uncertainties in area burned, land cover, and fuel consumption // Can. J. Forest Res. 2013. Vol. 43. No. 5. P. 493–506. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2012-0367>.
- Lappalainen H., Petäjä T., Kujansuu J., Kerminen V., Skorokhod A., Kasimov N., et al. Pan Eurasian Experiment (PEEX) – a research initiative meeting the grand challenges of the changing environment of the northern pan-eurasian arctic- boreal areas // Geography. Environment. Sustainability. 2014. Vol. 7. No. 2. P. 13-48. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2014-7-2-13-48>.
- Loupian E.A., Lozin D.V., Balashov I.V., Bartalev S. A., Stytsenko F. V. A Study of the Dependence of the Degree of Forest Damage by Fires on the Intensity of Burning According to Satellite-Monitoring Data // Cosmic Res. 2022. 60 (Suppl.1), P.46–56/ <https://doi.org/10.1134/S001095252270006X>
- Liu W., Lu F., Luo Y. et al. Human influence on the temporal dynamics and spatial distribution of forest biomass carbon in China. Ecol. Evol. 2017; 7: 6220– 6230. <https://doi.org/10.1002/ece3.3188>
- Mouillot F., Schultz M.G., Yue C., Cadule P., Tansey K., Ciais P., Chuvieco E. Ten Years of Global Burned Area Products from Spaceborne Remote Sensing — A Review: Analysis of User Needs and Recommendations for Future Developments // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2014. Vol. 26. P. 64–79 <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.05.014>.
- Ponomarev E.I., Shvetsov E.G., Kharuk V.I. The Intensity of Wildfires in Fire Emissions Estimates // Russian Journal of Ecology. 2018. Vol. 49. No. 6. P. 492–499. <https://doi.org/10.1134/S1067413618060097>.
- Ponomarev E.I.; Yakimov N.D.; Ponomareva T.V.; Yakubailik O.E.; Conard, S.G. Current Trend of Carbon Emissions from Wildfires in Siberia // Atmosphere 2021, 12, 559 pp. <https://doi.org/10.3390/atmos12050559>
- Ponomarev E.I., Zabrodin A.N., Shvetsov E.G., Ponomareva T.V. Wildfire Intensity and Fire Emissions in Siberia // Fire. 2023. Vol. 6. No. 7. 246 pp. <https://doi.org/10.3390/fire6070246>.
- Seiler W., Crutzen P.J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere from biomass burning // Clim. Change. 1980. Vol. 2. No. 3. P. 207–247.
- Shvidenko, A.Z. Climate change and wildfires in Russia / A. Z. Shvidenko, D. G. Schepaschenko // Contemporary Problems of Ecology. — 2013. — Vol. 6, No. 7. — P. 683-692. — DOI 10.1134/S199542551307010X. — EDN SLJQHN.
- Shvidenko A.Z., Shchepaschenko D.G., Vaganov E.A., Sukhinin A.I. Emissiya parnikovykh gazov vsledstviye prirodnikh pozharov v Rossii v 1998-2012 gg. (Greenhouse gas emissions due to wildfires in Russia in 1998-2012) // Okhrana atmosfernogo vozdukh. Atmosfera. 2012. No. 1. P. 6-13. (in Russian)
- Shi Y., Zang S., Matsunaga T., Yamaguchi Y. A multiyear and high-resolution inventory of biomass burning emissions in tropical continents from 2001–2017 based on satellite observations // J. Cleaner Production. 2020. 270, 122511. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122511>
- Sukhinin A.I., French N.H.F., Kasischke E.S., Hewson J.H., Soja A.J., Csiszar I.A., Hyer E.J., Loboda T., Conrad S.G., Romasko V.I., Pavlichenko E.A., Miskiv S.I., Slinkina O.A. AVHRR-based mapping of fires in Russia: New products for fire management and carbon cycle studies // Remote Sensing of Environment. v. 93 (2004). pp. 546–564.
- The Third Assessment Report on Climate Change and its Consequences in the Russian Federation // Ed. by V.M. Kattsov (Roshydromet). St. Petersburg: Science-Intensive Technologies, 2022. 676 p.
- Valendik E.N., Matveyev P.M., Sofronov M.A. Krupnyye lesnyye pozhary (Large forest fires) // M.: Nauka, 1979. 197 pp. (in Russian).
- 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., 4, 625–641. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-625-2011>
- Zalesov A.S. Klassifikatsiya lesnykh pozharov // Metodicheskiye ukazaniya po kursu “Lesnaya pirologiya” (Classification of forest fires. Methodical instructions for the course “Forest pyrology”) // Ekaterinburg: USLTU, 2011. 14 pp. (in Russian)