

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

# ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗ КОСМОСА ПОСЛЕДСТВИЙ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ ДЛЯ РАЗНЫХ ТИПОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

© 2022 г. В. Г. Бондур<sup>а</sup>, \*, К. А. Гордо<sup>а</sup>, А. Л. Зима<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

\*E-mail: office@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 28.09.2022 г.

Путем сопоставления космических данных низкого и среднего пространственного разрешения получены корректирующие коэффициенты, позволяющие повысить точность оценок площадей выгоревших территорий и обусловленных ими объемов эмиссий с учетом различных типов растительного покрова по данным продукта MCD64A1. Проведен анализ уточненных оценок площадей выгоревших лесных, кустарниковых и лугово-степных территорий Российской Федерации, а также объемов эмиссий вредных примесей, обусловленных природными пожарами в период времени с 2001 по 2021 гг. Установлено, что за 20-летний период в целом по стране ежегодно выгорало от 16.1 до 104.5 тыс. км<sup>2</sup> лесных, кустарниковых и лугово-степных территорий. При этом максимальные объемы эмиссий углеродсодержащих газов и мелкодисперсных аэрозолей за исследуемый период были вызваны лесными пожарами. Обнаружено, что в 2016 и 2021 гг. объемы эмиссий CO, CO<sub>2</sub> и PM<sub>2.5</sub>, обусловленные сгоранием лесной биомассы на территориях Сибирского и Дальневосточного Федеральных округов, составили более 80% от общероссийских.

**Ключевые слова:** природные пожары, спутниковые данные, космический мониторинг, эмиссии, растительный покров

**DOI:** 10.31857/S0205961422060033

## ВВЕДЕНИЕ

Известно множество работ, посвященных исследованиям пространственно-временных распределений природных пожаров и их последствий с глобальной и региональной точек зрения с использованием космических данных для территорий различных стран, например, таких, как: Россия (Бондур, 2011, 2015; Бондур и др., 2016; 2019а, 2019б; 2020а, 2020б; 2021а, 2021б; Бондур, Гордо, 2018; Барталев и др., 2012; Воронова и др., 2022); Китай (Chen et al., 2017; Wei et al., 2020); США (Cattau et al., 2020; Kganyago, Shikwambana, 2020); Австралия (Filkov et al., 2020; Desservettaz et al., 2017; Bondur et al., 2021); Иран (Ardakani et al., 2011); страны Южной и Юго-Восточной Азии (Vadrevu et al., 2019); страны Африки (Palumbo et al., 2011; Molinario et al., 2014) и др. (Chuvieco et al., 2008).

Анализ результатов современных исследований показал, что оценка площадей территорий, пострадавших от природных пожаров, имеет ключевое значение не только для изучения степени повреждений растительного покрова, но и для учета воздействия этих стихийных явлений на состояние окружающей среды. Эмиссии, обусловленные природными пожарами, влияют на запас углерода в лесных экосистемах, а, следовательно, на углеродный баланс и загрязнение атмосферы в

целом (Бондур, 2015; Бондур и др., 2019а, 2019б; 2021а, 2021б; Bonan, 2008; Canadell, Raupach, 2008; Liu et al., 2017).

Результаты оценок по космическим данным объемов эмиссий, вызываемых природными пожарами, зависят от таких параметров, как: площади выгоревших территорий; интенсивность пожаров; типы и объемы сжигаемой растительности (Бондур, 2015; Бондур и др., 2016, 2020а, 2020б; Бондур, Гордо, 2018; Bondur et al., 2022; Junpen et al., 2020; Shi, Yamaguchi, 2014; Shi et al., 2020).

Оценка объемов эмиссий, обусловленных природными пожарами, во многом зависит от точности определения площадей выгоревших территорий (Houghton, Nassikas, 2017; Van Der Werf et al., 2010, 2017; Wiedinmyer et al., 2011; Бондур, 2015; Бондур, Гордо, 2018; Junpen et al., 2020). При этом следует учитывать взаимосвязь объемов выбросов с сезонной динамикой природных пожаров и типами сгораемой биомассы.

В настоящее время существует ряд подходов, позволяющих выявлять очаги природных пожаров и проводить оценку их последствий в том числе и на состояние воздушной среды с помощью данных, полученных из космоса. Основными из них являются анализ активных очагов горения, определяемых по тепловым каналам спутниковой аппаратуры (Бондур, 2011, 2015; Бондур

и др., 2016, 2020а, 2020б; Бондур, Гордо, 2018), а также анализ площадей выгоревших территорий, определяемых по спектрально-отражательным характеристикам растительного покрова (Барталев и др., 2012; Бондур, Гордо, 2018; Пономарев и др., 2017; Giglio et al., 2016, 2018).

Наиболее перспективным подходом для исследования пространственно-временных вариаций площадей природных пожаров и связанных с ними объемов эмиссий малых газовых компонент и мелкодисперсных аэрозолей по космическим данным является комплексное использование данных различного пространственного разрешения.

В настоящей работе приведены оценки по спутниковым данным площадей выгоревших территорий и объемов эмиссий углеродсодержащих газов CO, CO<sub>2</sub> и мелкодисперсных аэрозолей PM<sub>2.5</sub>, обусловленных природными пожарами, для разных типов растительного покрова на всей территории Российской Федерации и отдельных ее крупных регионов в период с апреля по октябрь 2001–2021 гг. Для этого использовались данные спектрорадиометров MODIS, установленных на спутниках Terra и Aqua, и данные спутника Sentinel-2.

#### ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Используемая в настоящей работе методика основана на проведении сравнительного анализа значений площадей выгоревших территорий, полученных по спутниковым данным низкого (250 м–1 км) пространственного разрешения (Terra, Aqua) и среднего (10–30 м) пространственного разрешения (Sentinel-2). На основании результатов сравнения таких спутниковых данных с использованием экстраполяции соотношений площадей выгоревших территорий был получен корректирующий коэффициент  $n$  (Бондур, 2015; Бондур, Гордо, 2018) для формулы Сейлера–Крутцена (Seiler, Crutzen, 1980):

$$E = n \times A \times B \times C \times D, \quad (1)$$

где  $A$  – площадь пожара [м<sup>2</sup>];  $B$  – плотность биомассы на выгоревшей территории [кг/м<sup>2</sup>];  $C$  – полнота сгорания биомассы [%];  $D$  – коэффициент эмиссии (масса вещества, выбрасываемого в атмосферу при сгорании 1 кг биомассы) [г/кг];  $E$  – общая масса вещества, выбрасываемого в атмосферу в результате пожара [г];  $n$  – корректирующий коэффициент.

Далее, путем интеграции полученных результатов расчетов площадей выгоревших территорий и информации о типах и свойствах растительного покрова на выгоревших участках по формуле (1) производилась оценка объемов эмиссий различных газов и аэрозолей, обусловленных сгоранием биомассы при природных пожарах.

В ходе развития метода оценки динамики площадей природных пожаров и пространственно-временных вариаций эмиссий различных газов и аэрозолей от них для оценки площадей выгоревших территорий в качестве основного был использован ежемесячный продукт MCD64A1 (Giglio et al., 2018), полученный прибором MODIS (спутники Terra и Aqua) версии 6 с пространственным разрешением 500 м, содержащий информацию о площади выгорания. В этом продукте применяется гибридный алгоритм, работающий на совместном использовании данных тепловых аномалий и измерений отражательной способности в ближних ИК-каналах.

Для проведения сравнительного анализа и сопоставления площадей выгоревших территорий, обнаруженных по спутниковым данным низкого и среднего пространственного разрешения, в качестве региона исследования были выбраны тестовые участки на территории Российской Федерации. В качестве тестовых участков, пройденные огнем в 2021 г., которые содержали три основных типа растительного покрова: лесной, кустарниковый и лугово-степной. При этом для получения наиболее точных оценок были выбраны территории исследования не подверженные воздействию природных пожаров в течение предшествующих десяти лет.

Тип и характеристики растительного покрова определялись с использованием ежегодного продукта MCD12Q1 (MODIS Land Cover Type 500 m), полученного прибором MODIS (спутники Terra и Aqua) на основе классификации международной геосферно-биосферной программы (IGBP) (Friedl et al., 2010), которая содержит 17 классов растительности и имеет тематическую точность в среднем 70–75%. Согласно данной легенде для территории Российской Федерации пять классов были отнесены к лесному покрову, два к кустарниковому, три к лугово-степному.

Эталонные значения площадей выгоревших территорий были получены путем оконтуривания обнаруженных участков, пройденных огнем, по синтезированному (каналы 4, 3, 2) изображению среднего пространственного разрешения, полученным спутником Sentinel-2 (<https://sentinel.esa.int/>).

Для оценки пространственно-временных вариаций эмиссий различных газов и аэрозолей, обусловленных природными пожарами, использовалась модифицированная формула Сейлера–Крутцена (Seiler, Crutzen, 1980), которая была дополнена корректирующим коэффициентом  $n$ , полученным в ходе проведения экспериментальных исследований (1). При использовании формулы (1) значения площадей пожаров  $A$  определялись по космическим данным, а значения коэффициентов  $B$ ,  $C$  и  $D$  соответствовали конкретным типам растительности, произрастающей на исследуемой территории, и были получены с ис-

пользованием результатов работ (Wiedinmyer et al., 2011; Akagi et al., 2011; Andreae, 2019).

На рис. 1 в качестве примера представлены синтезированные изображения с выделенными контурами выгоревшей области, полученные по данным спутника Sentinel-2 (красные линии) и прибора MODIS спутников Terra и Aqua (синие линии): *a* – Момский район Республики Саха (16 июля 2021 г.); *б* – Усть-Кутский район Иркутской области (24 июня 2021 г.); *в* – Усть-Янский район Республики Саха (25 июня 2021 г.).

Из анализа рис. 1 видно, что по спутниковым данным среднего пространственного разрешения (спутник Sentinel-2) контуры гарей и площади выгоревших территорий выявляются с большей точностью, чем по изображениям низкого разрешения (спутники Terra и Aqua).

Путем сопоставления результатов оценок площадей природных пожаров для тестовых участков, полученных по спутниковым данным разного пространственного разрешения, были получены значения корректирующего коэффициента  $n$  (Бондур, 2015; Бондур, Гордо, 2018) для каждого из исследуемых типов растительного покрова (лесной, кустарниковый, лугово-степной). В результате среднее значение коэффициента  $n$  для выгоревших площадей лесных территорий составило 1.6, для кустарниковых 1.3, для лугово-степных 1.4.

С помощью полученных коэффициентов площади выгоревших территорий по данным прибора MODIS (продукт MCD64A1) были скорректированы в зависимости от типа растительного покрова, что в свою очередь позволяло проводить более точные оценки динамики площадей природных пожаров и пространственно-временных вариаций эмиссий различных газов и аэрозолей от них.

В ходе исследования была проведена оценка ежегодной динамики площадей, выгоревших лесных, кустарниковых и лугово-степных территорий и вызванных сгоранием биомассы объемов эмиссий в пожарный период с апреля по октябрь 2001–2021 гг. для всей территории Российской Федерации и четырех ее крупных регионов: Европейской части России (ЕЧР), Уральского федерального округа (УрФО), Сибирского федерального округа (СФО) и Дальневосточного федерального округа (ДФО).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 2 представлены ежегодные распределения скорректированных значений выгоревших площадей и обусловленных ими объемов эмиссий на территории Российской Федерации для различных типов растительного покрова, полученных в результате космического мониторинга за 20-ти летний период времени с 2001 по 2021 гг.

Анализ рис. 2, *a* показал, что динамика ежегодных распределений площадей выгоревших терри-

торий для исследуемых типов растительного покрова имеет волнообразный характер, при этом максимальные значения для лесных и лугово-степных пожаров совпадают и соответствуют пожарам, произошедшим в 2003, 2006, 2008, 2012, 2014, 2016, 2018 и 2021 гг. Пиковые же значения площадей выгоревших кустарниковых территорий выявлены в 2003, 2010, 2013, 2016 и 2020 гг. Из анализа рис. 2, *a* следует, что за исследуемый период времени ежегодно выгорало от 16.1 до 97.8 тыс. км<sup>2</sup> лесных, от 1.3 до 6.4 тыс. км<sup>2</sup> кустарниковых и от 40.6 до 104.5 тыс. км<sup>2</sup> лугово-степных территорий. Наибольшие площади выгоревших территорий были обнаружены в 2003 (103.5 тыс. км<sup>2</sup>) и 2008 (101.2 тыс. км<sup>2</sup>) гг. и соответствовали лугово-степному типу растительного покрова. При этом наибольшие площади лесных пожаров были обнаружены в 2003 и 2012 гг. и составили 97.8 и 91.9 тыс. км<sup>2</sup> соответственно, а максимальные значения площадей выгоревших кустарниковых территорий были обнаружены в 2003 (23.9 тыс. км<sup>2</sup>), 2010 (17 тыс. км<sup>2</sup>) и 2020 (15.7 тыс. км<sup>2</sup>) гг.

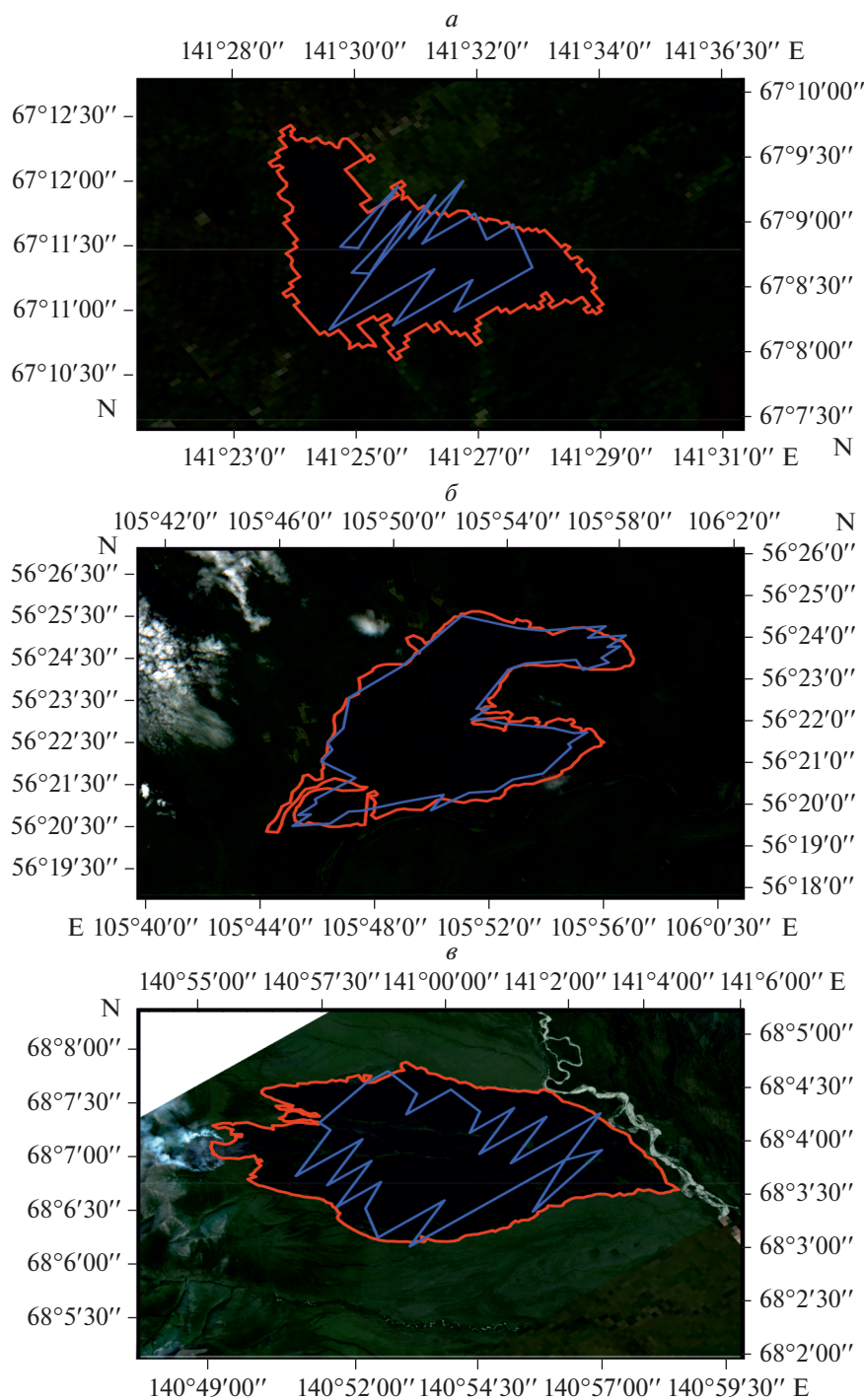
Следует отметить, что среднее значение площади выгоревших кустарниково-луговых территорий за исследуемый период времени составило 64 тыс. км<sup>2</sup>, что на 25% превышает данный показатель для лесного покрова (48 тыс. км<sup>2</sup>). При этом, как следует из анализа рис. 2, *б*, 2, *в*, 2, *г*, наибольшие объемы эмиссий CO, CO<sub>2</sub> и PM2.5 были обусловлены именно пожарами на лесных территориях.

Совместный анализ рис. 2 показал, что значения объемов эмиссий вредных примесей в атмосферу были примерно пропорциональны площадям выгоревших территорий.

Из рис. 2, *б*, 2, *в*, 2, *г*. следует, что наибольшие объемы выбросов CO, CO<sub>2</sub> и PM2.5 от лесных пожаров, соответствовавшие максимальным значениям выгоревших площадей, были обнаружены в 2003 г. и составили 24.8, 470.3, 3.3 млн. т соответственно. Максимальные значения объемов эмиссий CO, CO<sub>2</sub> и PM2.5, обусловленные кустарниковыми пожарами, были выявлены в 2003 г. и составили 88.44, 3.5 и 0.4 млн. т соответственно. Объемы эмиссий CO, CO<sub>2</sub> и PM2.5, вызванные лугово-степными пожарами, достигали своих максимумов в 2003 (6.3, 173 и 0.6 млн. т соответственно) и 2008 (6.1, 169 и 0.64 млн. т соответственно) гг.

Анализ результатов, представленных на рис. 2, показал, что для территории Российской Федерации в настоящей работе для исследуемых типов растительного покрова наибольшие значения выгоревших площадей и обусловленных ими объемов выбросов определялись в 2003 г.

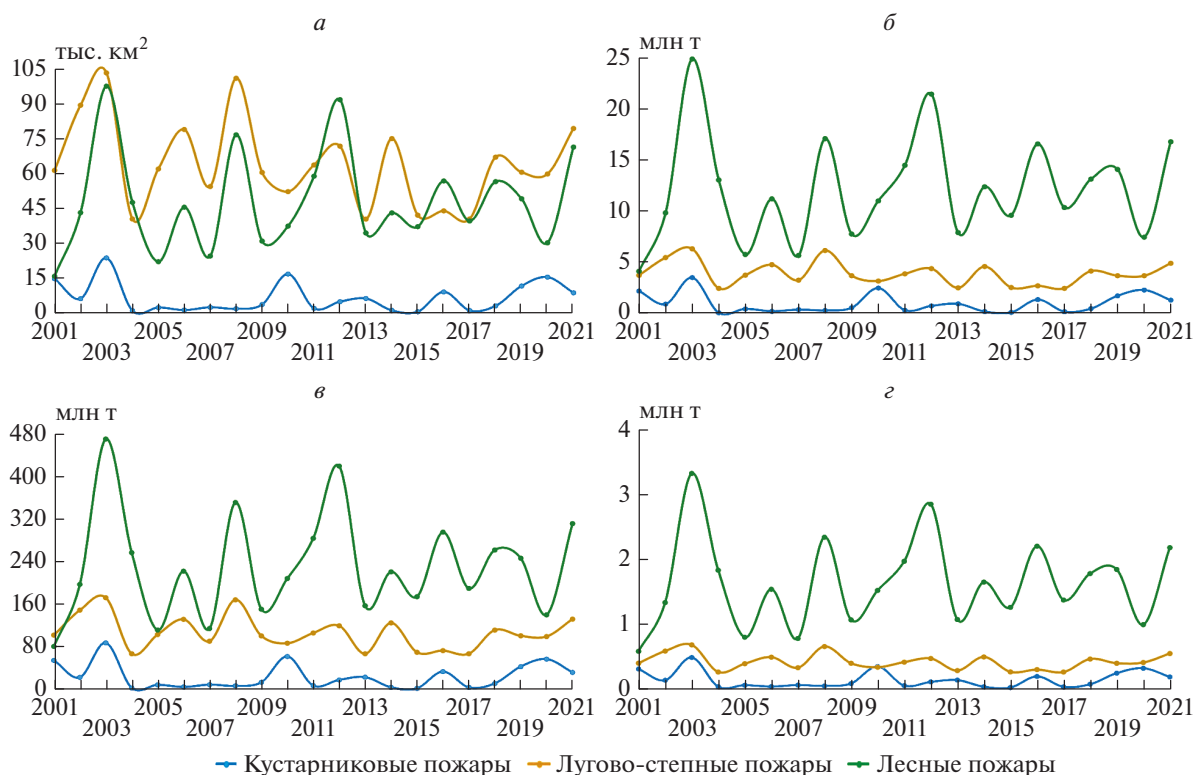
На рис. 3 представлены распределения ежегодных значений выгоревших площадей лесных, кустарниковых и лугово-степных территорий для



**Рис. 1.** Синтезированные изображения с выделенными контурами выгоревшей области по данным спутника Sentinel-2 (красные линии) и прибора MODIS спутников Terra и Aqua (синие линии): *a* – Момский район Республики Саха (16 июля 2021 г.); *b* – Усть-Кутский район Иркутской области (24 июня 2021 г.); *v* – Усть-Янский район Республики Саха (25 июня 2021 г.).

крупных регионов Российской Федерации. Из рис. 3, *a* видно, что наибольшие площади лесных пожаров характерны для Сибирского и Дальневосточного федеральных округов, на территории которых в целом преобладает лесная раститель-

ность. При этом максимальное значение было выявлено в 2003 г. на территории СФО и составило 69.5 тыс. км<sup>2</sup>, а также значительные площади выгоревших лесных территорий зафиксированы в 2012 (36.2 тыс. км<sup>2</sup>) и 2016 (44.9 тыс. км<sup>2</sup>) гг.



**Рис. 2.** Ежегодные распределения значений выгоревших площадей и обусловленных ими объемов эмиссий на территории Российской Федерации по типам растительного покрова с 2001 по 2021 гг.: *a* – площади выгоревших территорий; *б* – объемы эмиссий CO; *в* – объемы эмиссий CO<sub>2</sub>; *г* – объемы эмиссий PM2.5.

В ДФО наибольшая площадь лесных пожаров была выявлена в 2021 г. и составила 60,6 тыс. км<sup>2</sup>. Несмотря на то, что на территории ЕЧР и УрФО площади лесных пожаров имеют более низкие значения, из рис. 3, *a* следует, что для данных федеральных округов также характерна волнообразная тенденция. Максимальные площади выгоревших лесных территорий в ЕЧР были обнаружены в 2010 (14 тыс. км<sup>2</sup>) и 2018 (10,8 тыс. км<sup>2</sup>) гг., а в УрФО в 2004 (13,2 тыс. км<sup>2</sup>) г.

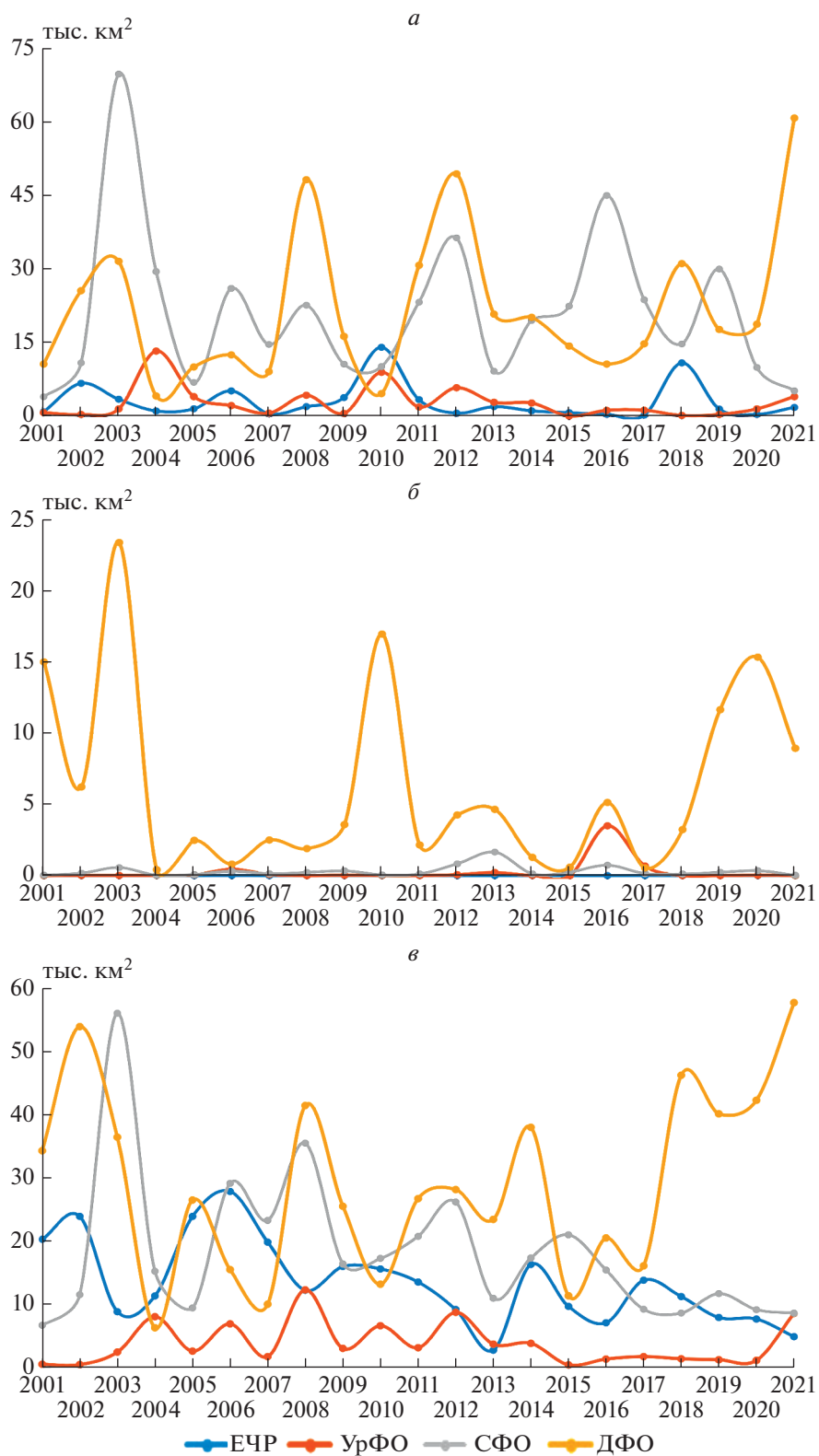
Анализ рис. 3, *б* показал, что в целом наибольшие площади выгоревших кустарниковых территорий были выявлены в ДФО, максимальные значения достигались в 2003, 2010 и 2020 гг. При этом следует отметить, что для ЕЧР, СФО и УрФО ежегодные вариации изменений суммарных значений выгоревших территорий для кустарникового типа растительного покрова достаточно равномерны, исключениями являются 2013 г. в СФО и 2016 г. в УрФО, когда были обнаружены превышения.

Из анализа рис. 3, *в* следует, что ежегодные вариации изменений площадей лугово-степных пожаров имеют волнообразный характер для исследуемых регионов Российской Федерации. Наибольшие площади выгоревших территорий приходятся на ДФО, СФО и ЕЧР.

Анализ рис. 3 показал, что наибольшие суммарные ежегодные площади выгоревших территорий были выявлены в СФО и ДФО. При этом в СФО наибольшая доля выгоревшей растительности приходится на лесные и лугово-степные территории. Похожая тенденция складывается и в УрФО, однако на данной территории в 2016 г. были обнаружены достаточно высокие значения площадей выгоревшей кустарниковой растительности. Для территории ЕЧР в большей степени характерны лугово-степные пожары, также значительную долю занимают лесные, высокие площади которых определялись в 2010 и 2018 гг.

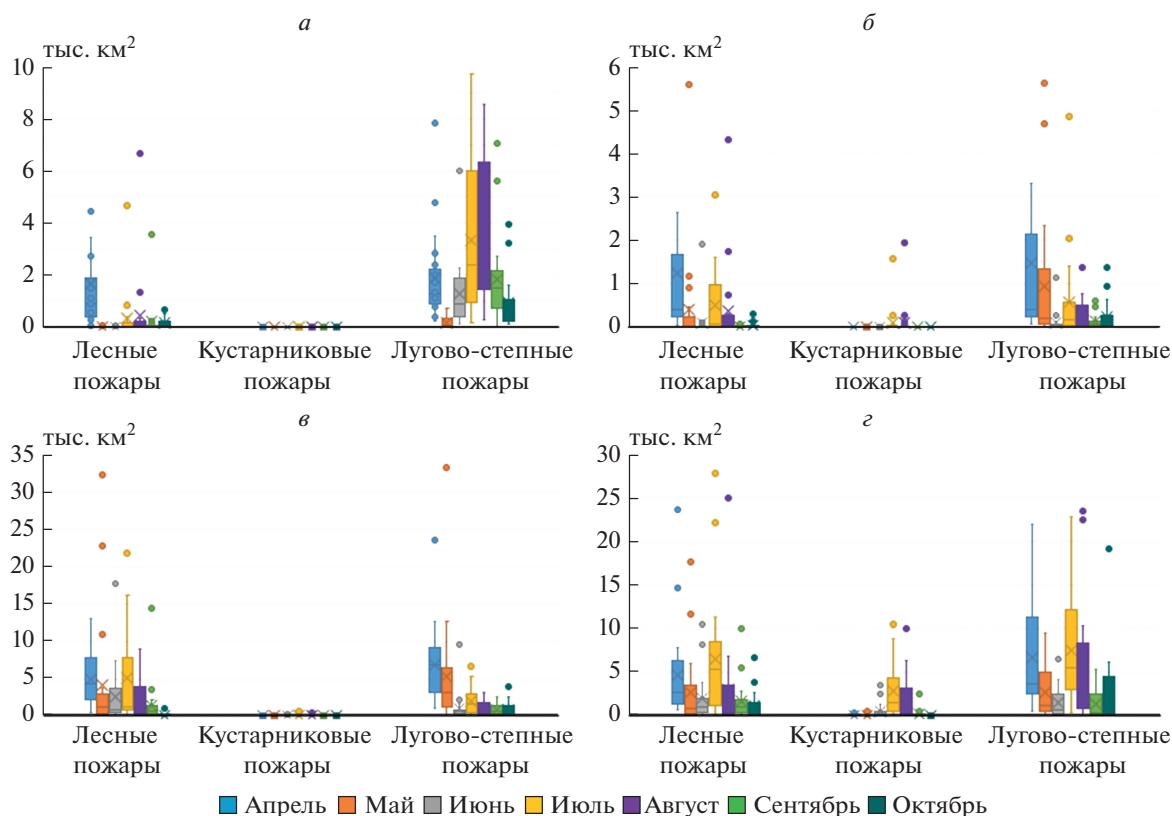
На рис. 4 представлены распределения ежемесячных значений площадей выгоревших участков на территории крупных регионов Российской Федерации по типам растительного покрова в период с апреля по октябрь 2001–2021 гг.

Анализ рис. 4, *a* показал, что на территории ЕЧР наибольшие площади лесных пожаров определялись в апреле, июле и августе. Несмотря на то, что, исходя из рис. 4 *a*, наибольшие среднемесячные площади лесных пожаров за исследуемый период приходятся на апрель, максимальное значение было выявлено в августе и составило 6,67 тыс. км<sup>2</sup>. Наибольшие площади выгоревших лугово-степных территорий характерны для июля и августа, однако высокие показатели наблюда-



**Рис. 3.** Распределение ежегодных значений выгоревших площадей: *а* – лесных, *б* – кустарниковых, *в* – лугово-степных территорий для крупных регионов Российской Федерации в период 2001–2021 гг.





**Рис. 4.** Распределения ежемесячных значений выгоревших площадей на территории крупных регионов Российской Федерации по типам растительного покрова в период с апреля по октябрь 2001–2021 гг.: *а* – на территории ЕЧР; *б* – на территории УрФО; *в* – на территории СФО; *г* – на территории ДФО.

ются также в апреле и сентябре. Ежемесячные площади кустарниковых пожаров незначительны и распределены равномерно.

Из анализа рис. 4, *б* следует, что в УрФО наибольшие средние значения площадей выгоревших лесных территорий были характерны для апреля и июля, однако наблюдались также их единичные высокие значения в мае (5.57 тыс. км<sup>2</sup>) и августе (4.3 тыс. км<sup>2</sup>). Высокие значения площадей лугово-степных пожаров характерны для апреля, мая и июля. Выгоревшие площади кустарниковых пожаров были обнаружены в большей степени в июле и августе.

На рис. 4, *в* показано, что ежемесячные кустарниковые пожары на территории СФО распределены примерно равномерно с небольшим преобладанием в июле и августе, при этом лугово-степные пожары преобладают в апреле и мае. Анализ рис. 4, *в*, *г* показал, что пожары на лесных территориях в СФО и ДФО имеют похожую сезонную динамику. Наибольшие площади характерны для апрельских, июльских и августовских пожаров. При этом в СФО anomalно высокие значения площадей пожаров были обнаружены также в мае (32.2 тыс. км<sup>2</sup>). Из анализа рис. 4, *г* следует, что в ДФО наибольшие значения площадей выгоревшей кустарниковой растительно-

сти наблюдались в июле и августе. Лугово-степные же территории наиболее сильно подвержены пожарам в апреле, июле и августе.

Анализ ежемесячных распределений площадей природных пожаров, представленный на рис. 4, показал, что за период 2001–2021 гг. для исследуемых регионов территории Российской Федерации наибольшие среднемесячные площади выгоревших территорий для изучаемых типов растительного покрова наблюдались в апреле, июле и августе, при этом anomalно высокие значения обнаруживались и в мае.

На рис. 5 представлено распределение вкладов ежегодных суммарных объемов эмиссий CO, CO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>, обусловленных лесными (см. рис. 5, *а*), кустарниковыми (см. рис. 5, *б*) и лугово-степными (см. рис. 5, *в*) пожарами на территориях ЕЧР, УрФО, СФО и ДФО, в общероссийские объемы таких эмиссий в период с 2001 по 2021 гг.

Из анализа рис. 5, *а* следует, что наибольший вклад в общероссийские объемы эмиссий, обусловленные сгоранием лесных территорий вносят пожары в СФО и ДФО. Вклад данных регионов составил от 8 до 80% для СФО и от 9 до 83% для ДФО за исследуемый период. Вклад СФО был преобладающим в 2003, 2004, 2006, 2007, 2015–2017, 2019 гг. В 2016 г. этот вклад достигал 80% всех

**Таблица 1.** Средние значения объемов эмиссий CO, CO<sub>2</sub>, PM2.5, обусловленных лесными, кустарниковыми и лугово-степными пожарами на территориях ЕЧР, УрФО, СФО и ДФО за период 2001–2021 гг.

Параметр		Лесные пожары	Кустарниковые пожары	Лугово-степные пожары
		млн. т		
ЕЧР	CO	0.8	0.0003	0.7
	CO <sub>2</sub>	16.5	0.008	22.5
	PM2.5	0.11	0.0004	0.14
УрФО	CO	0.7	0.03	0.2
	CO <sub>2</sub>	14.1	0.9	6.3
	PM2.5	0.099	0.004	0.02
СФО	CO	5.7	0.04	1.9
	CO <sub>2</sub>	105.7	1.1	30.1
	PM2.5	0.7	0.006	0.1
ДФО	CO	4.8	0.9	1.8
	CO <sub>2</sub>	97.3	23.04	48.7
	PM2.5	0.6	0.1	0.2

выбросов от сгорания лесной биомассы на территории Российской Федерации. При этом вклад ДФО преобладал в 2001, 2002, 2005, 2008, 2009, 2011, 2013, 2018 и 2021 гг.

Как показано в табл. 1 наибольшие средние значения ежегодных объемов эмиссий CO, CO<sub>2</sub>, PM2.5, обусловленных лесными пожарами за период времени 2001–2021 гг., были обнаружены в СФО и составили 5.7, 105.7, 0.7 млн. т соответственно.

На территории ЕЧР вклад лесных пожаров в общие объемы эмиссий был преобладающим и составил 40% в 2010 г., когда в данном регионе происходили аномальные природные пожары (Бондур, 2011).

Анализ рис. 5, б показал, что в 2001–2003, 2005, 2007–2011, 2014, 2018–2021 гг. вклад эмиссий, обусловленных кустарниковыми пожарами на территории ДФО, в общероссийские превышал 90%. Это обусловлено особенностями растительного покрова в данном регионе, где территории, покрытые кустарниковой растительностью, имеют значительные площади и подвержены ежегодным природным пожарам.

Также из анализа рис. 5, б видно, что в 2006, 2016, и 2017 гг. значительный вклад вносят эмиссии, обусловленные пожарами на территории УрФО. Вклад СФО увеличивается в период 2005–2018 гг., затем снова идет на спад. Как следует из табл. 1 наибольшие средние значения ежегодных объемов эмиссий CO, CO<sub>2</sub>, PM2.5 за период 2001–2021 гг., обусловленных кустарниковыми пожарами, обнаружены в ДФО и составили 0.9, 23.04, 0.1 млн. т соответственно.

Из анализа рис. 5, в следует, что наибольший вклад в общероссийские объемы эмиссий, обусловленные сгоранием лугово-степной растительности, вносит СФО и ДФО. Вклад ДФО был максимальным в 2021 г. и составил 72%. Можно

отметить, что вклад СФО после 2015 г. идет на спад, снижаясь с 49 до 11%. Для ЕЧР тенденция к снижению наблюдается после 2017 г. Согласно табл. 1 наибольшие средние значения ежегодных объемов эмиссий CO, CO<sub>2</sub>, PM2.5 за период 2001–2021 гг., обусловленных лугово-степными пожарами, обнаружены в ДФО и составили 1.8, 48.7, 0.2 млн. т соответственно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате обработки многолетних данных спутникового мониторинга проведена оценка площадей выгоревших территорий и объемов эмиссий различных газов и аэрозолей при природных пожарах на территории Российской Федерации и отдельных ее регионов для трех типов преобладающего растительного покрова: лесной, кустарниковый, лугово-степной.

Установлено, что в период с 2001 по 2021 гг. в целом по стране ежегодно выгорало от 16.1 до 97.8 тыс. км<sup>2</sup> лесных, от 1.3 до 6.4 тыс. км<sup>2</sup> кустарниковых и от 40.6 до 104.5 тыс. км<sup>2</sup> лугово-степных территорий. Среднее значение площадей выгоревших кустарниково-луговых территорий за исследуемый период времени составило 64 тыс. км<sup>2</sup>, что на 25% превышает данный показатель для лесного покрова (48 тыс. км<sup>2</sup>), однако наибольшие ежегодные объемы эмиссий CO, CO<sub>2</sub> и PM2.5 обусловлены именно пожарами на лесных территориях. Это обусловлено тем, что сгорание лесной биомассы приводит к большим объемам эмиссий, в сравнении с другими типами растительности.

Максимальные объемы эмиссий CO, CO<sub>2</sub> и PM2.5 на территории Российской Федерации от лесных пожаров были выявлены в 2003 г. и составили 24.8, 470.3, 3.3 млн. т соответственно. При этом наибольший вклад в общероссийские объемы эмиссий, обусловленные сгоранием лесных





**Рис. 5.** Распределение вкладов ежегодных суммарных объемов эмиссий CO, CO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>, обусловленных: *a* – лесными, *б* – кустарниковыми, *в* – лугово-степными пожарами на территориях ЕЧР, УрФО, СФО и ДФО в общероссийские объемы эмиссий в период с 2001 по 2021 гг.

территорий, вносят пожары в СФО и ДФО. Вклад данных регионов в некоторые годы достигал более чем 80%.

Установлено, что наибольшие суммарные ежегодные площади выгоревших территорий были выявлены в СФО и ДФО. При этом в СФО наибольшая доля выгоревшей растительности приходится на лесные и лугово-степные территории. Для ДФО характерны значительные площади и лесных, и кустарниковых, и лугово-степных выгоревших территорий. В УрФО преобладают выгоревшие лесные и лугово-степные территории, также в 2016 г. были обнаружены аномально высокие для данного региона значения выгоревших площадей кустарникового покрова. Для территории ЕЧР в большей степени характерны лугово-степные пожары, также значительную долю занимают лесные, высокие площади которых определялись в 2010 и 2018 гг.

Таким образом, предложенный метод анализа спутниковых данных, основанный на применении поправочных коэффициентов, позволяет получать более достоверные значения площадей выгоревших территорий, а, следовательно, наиболее точные оценки объемов эмиссий различных газов и аэрозолей в атмосферу. Это обеспечивает возможность проводить оценку динамики и пространственно-временных вариаций этих явлений на больших территориях. В дальнейшем корректирующие коэффициенты могут быть получены для других типов растительного покрова в зависимости от особенностей исследуемых территорий.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности применения описанного подхода, основанного на использовании спутниковых данных для мониторинга природных пожаров и их последствий. Продолжением исследований может стать дальнейший детальный анализ региональных и внутрисезонных особенностей анализируемых аномальных явлений, в том числе оценка взаимосвязи возникновения природных пожаров в исследуемых регионах 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

*Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Луян Е.А., Стыценок 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.

*Бондур В.Г.* Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010 г. // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 3. С. 3–13.

*Бондур В.Г.* Космический мониторинг эмиссий малых газовых компонент и аэрозолей при природных пожарах в России // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 6. С. 21–35.

<https://doi.org/10.7868/S0205961415060032>

*Бондур В.Г., Воронова О.С., Гордо К.А., Зима А.Л.* Космический мониторинг изменчивости площадей природных пожаров и эмиссий вредных примесей в атмосферу на территории различных регионов России за 20-летний период // Докл. АН. 2021а. Т. 500. № 2. С. 216–222.

<https://doi.org/10.31857/S2686739721100042>

*Бондур В.Г., Воронова О.С., Гордо К.А., Зима А.Л., Феоктистова Н.В.* Космический мониторинг многолетних природных пожаров и объемов вызываемых ими эмиссий вредных примесей в воздушную среду Австралии // Исслед. Земли из космоса. 2021б. № 1. С. 25–40.

<https://doi.org/10.31857/S0205961421010048>

*Бондур В.Г., Воронова О.С., Черепанова Е.В., Цидилина М.Н., Зима А.Л.* Пространственно-временной анализ многолетних природных пожаров и эмиссий вредных газов и аэрозолей в России по космическим данным // Исслед. Земли из космоса. 2020а. № 4. С. 3–17.

<https://doi.org/10.31857/S0205961420040028>

*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 // Исслед. 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 // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 6. С. 3–20.

<https://doi.org/10.7868/S0205961416060105>

*Бондур В.Г., Мохов И.И., Воронова О.С., Ситнов С.А.* Космический мониторинг сибирских пожаров и их последствий: особенности аномалий 2019 года и тенденции 20-летних изменений // Докл. АН. 2020б. Т. 492. № 1. С. 99–106.

<https://doi.org/10.31857/S2686739720050047>

*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 // Докл. АН. 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 // Исслед. Земли из космоса. 2019б. № 3. С. 13–32.

<https://doi.org/10.31857/S0205-96142019313-32>

*Воронова О.С., Гордо К.А., Зима А.Л., Феоктистова Н.В.* Сильные природные пожары на территории России в 2021 г., обнаруженные по космическим данным // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 1. С. 1–15.

<https://doi.org/10.31857/S0205961422010080>

*Пономарев Е.И., Харук В.И., Якимов Н.Д.* Результаты и перспективы спутникового мониторинга природных пожаров Сибири // Сибирский лесной журн. 2017. № 5. С. 25–36.

<https://doi.org/10.15372/SJFS20170503>

- Akagi S.K., Yokelson R.J., Wiedinmyer C., Alvarado M.J., Reid J.S., Karl T., Crouse J.D., Wennberg P.O.* Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models // *Atmos. Chem. Phys.*, 2011. 11, 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, 8523–8546 <https://doi.org/10.5194/acp-19-8523-2019>
- Ardakani A.S., Valadan Zoj M.J., Mohammadzadeh A., Mansourian A.* Spatial and temporal analysis of fires detected by MODIS data in northern Iran from 2001 to 2008. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 2011, 4, 216–225. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2010.2088111>
- 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. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
- Bondur V.G., Gordo K.A., Voronova O.S., Zima A.L.* Satellite Monitoring of Anomalous Wildfires in Australia // *Front. Earth Sci.* 2021. 8: 617252. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.617252>
- Bondur V., Chimtdorzhiev T., Kirbizhekova I., Dmitriev A.* Estimation of Postfire Reforestation with SAR Polarimetry and NDVI Time Series. *Forests* 2022, 13, 814. <https://doi.org/10.3390/f13050814>
- Canadell J.G., Raupach M.R.* Managing forests for climate change mitigation. *Science* (New York, N.Y.), 2008. 320(5882), 1456–1457. <https://doi.org/10.1126/science.1155458>
- Cattau M.E., Wessman C., Mahood A., Balch J.K.* Anthropogenic and lightning-started fires are becoming larger and more frequent over a longer season length in the U.S.A. *Global Ecol Biogeogr.* 2020; 29: 668–681. <https://doi.org/10.1111/geb.13058>
- Chen D., Pereira J.M.C., Masiero A., Pirotti F.* Mapping fire regimes in China using MODIS active fire and burned area data. *Appl. Geogr.* 2017, 85, 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.05.013>
- Chuvieco E., Giglio L., Justice C.* (2008), Global characterization of fire activity: toward defining fire regimes from Earth observation data. *Global Change Biology*, 14: 1488–1502. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01585.x>
- Desservettaz M. et al.* Emission factors of trace gases and particles from tropical savanna fires in Australia, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2017. 122, 6059–6074. <https://doi.org/10.1002/2016JD025925>
- Filkov A., Ngo T., Matthews S., Telfer S., Penman T.* Impact of Australia's catastrophic 2019/20 bushfire season on communities and environment. Retrospective analysis and current trends // *J. Safety Science and Resilience.* 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2020.06.009>
- Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A. et al.* (2010). MODIS Collection 5 global land cover: algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sens. Environ.* 114(1), 168–182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.016>
- 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. V. 217. P. 72–85
- Giglio L., Schroeder W., Justice C.O.* The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // *Remote Sensing of Environment.* 2016. V. 178. P. 31–41. <https://doi.org/10.1071/WF03054>
- Houghton R.A., Nassikas A.A.* Global and regional fluxes of carbon from land use and land cover change 1850–2015 // *Global Biogeochemical Cycles.* 2017. T. 31. № 3. С. 456–472. <https://doi.org/10.1002/2016GB005546>
- 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>
- Kganyag M., Shikwambana L.* Assessment of the Characteristics of Recent Major Wildfires in the USA, Australia and Brazil in 2018–2019 Using Multi-Source Satellite Products. *Remote Sens.* 2020, 12, 1803. <https://doi.org/10.3390/rs12111803>
- 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>
- Molinario G., Davies D.K., Schroeder W., Justice C.O.* Characterizing the spatio-temporal fire regime in Ethiopia using the MODIS-active fire product: A replicable methodology for country-level fire reporting. *Afr. Geogr. Rev.* 2014, 33, 99–123. <https://doi.org/10.1080/19376812.2013.854708>
- Palumbo I., Grégoire J., Simonetti D., Punga M.* Spatio-temporal distribution of fire activity in protected areas of Sub-Saharan Africa derived from MODIS data. *Procedia Environ. Sci.* 2011, 7, 26–31. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.07.006>
- Seiler W., Crutzen P.J.* Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere from biomass burning // *Clim. Change.* 1980. V. 2. № 3. P. 207–247.
- Shi Y., Yamaguchi Y.* (2014). A high-resolution and multi-year emissions inventory for biomass burning in Southeast Asia during 2001–2010. *Atmospheric Environment*, 98, 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.050>
- Shi Y., Zang S., Matsunaga T., Yamaguchi Y.* (2020). A multi-year and high-resolution inventory of biomass burning emissions in tropical continents from 2001–2017 based on satellite observations // *J. Cleaner Production*, 270, 122511. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122511>
- Vadrevu K.P., Lasko K., Giglio L. et al.* Trends in Vegetation fires in South and Southeast Asian Countries. *Sci Rep* 9, 7422 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43940-x>
- Van Der Werf G.R., Randerson J.T., Giglio L., Van Leeuwen T.T., Chen Y., Rogers B.M., ... Kasibhatla P.S.* Global fire emissions estimates during 1997–2016. *Earth System Science Data*, 2017. 9(2), 697–720. <https://doi.org/10.5194/essd-9-697-2017>
- Van Der Werf G.R., Randerson J.T., Giglio L., Collatz G.J., Mu M., Kasibhatla P.S., Morton D.C., Defries R.S., Jin Y., Van Leeuwen T.T.* Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009). *Atmos. Chem. Phys.* 2010, 10, 11707–11711. <https://doi.org/10.5194/acp-10-11707-2010>
- Wei X., Wang G., Chen T., Hagan DFT., Ullah W.* A Spatio-Temporal Analysis of Active Fires over China during 2003–2016. *Remote Sensing.* 2020; 12(11): 1787. <https://doi.org/10.3390/rs12111787>
- 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>

## Satellite Research of the Effects of Wildfires on the Territory of Russia for Various Types of Vegetation Cover

V. G. Bondur<sup>1</sup>, K. A. Gordo<sup>1</sup>, and A. L. Zima<sup>1</sup>

<sup>1</sup>AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

By comparing satellite data of low and medium spatial resolution, correction factors have been obtained. They enable improvement of the accuracy estimates of burnt out areas and the volumes of emissions, taking into account various types of vegetation cover according to the MCD64A1 product. An analysis was made of updated estimates of the areas of burnt forest, shrub and meadow-steppe territories of the Russian Federation, as well as the volume of emissions of harmful pollutants caused by wildfires in the period from 2001 to 2021. It was found out that forest, shrub and meadow-steppe territories from 16.1 to 104.5 thousand km<sup>2</sup> were burnt out annually countrywide for a 20-year period. At the same time, the maximum volumes of emissions of carbon-containing gases and fine aerosols during the study period were caused by forest fires. It was revealed that in 2016 and 2021 the volumes of CO, CO<sub>2</sub> and PM<sub>2.5</sub> emissions caused by the combustion of forest biomass in the territories of the Siberian and Far Eastern Federal Districts exceeded the national average by more than 80%.

**Keywords:** wildfires, satellite data, satellite monitoring, emissions, vegetation cover

### 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.*, 11, 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.*, 19, 8523–8546. <https://doi.org/10.5194/acp-19-8523-2019>, 2019.
- Ardakani A.S., Valadan Zoj M.J., Mohammadzadeh A., Mansourian A. Spatial and temporal analysis of fires detected by MODIS data in northern Iran from 2001 to 2008. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 2011, 4, 216–225. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2010.2088111>
- Bartalev S.A., Yegorov V.A., Yefremov V.YU., Lupyayev Ye.A., Stytsenko F.V., Flitman Ye.V. 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. 9–26.
- Bonan G.B. (2008). Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science* (New York, N.Y.), 320(5882), 1444–1449. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
- Bondur V.G. Satellite monitoring of trace gas and aerosol emissions during wildfires in Russia // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. V. 52. № 9. P. 1078–1091.
- Bondur V.G. Satellite Monitoring of Wildfires during the Anomalous Heat Wave of 2010 in Russia // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011. V. 47. № 9. P. 1039–1048.
- 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. V. 54. № 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. V. 53. № 9. P. 859–874. <https://doi.org/10.1134/S0001433817090055>
- Bondur V.G., Gordo K.A., Voronova O.S., Zima A.L. Satellite Monitoring of Anomalous Wildfires in Australia // *Front. Earth Sci.* 2021. 8: 617252. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.617252>
- Bondur V.G., Mokhov I.I., Voronova O.S., Sitnov S.A. Satellite Monitoring of Siberian Wildfires and Their Effects: Features of 2019 Anomalies and Trends of 20-Year Changes // *Doklady Earth Sciences*. 2020b. V. 492. № 1. P. 370–375. <https://doi.org/10.1134/S1028334X20050049>.
- Bondur V.G., Tsidilina 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. V. 55. № 9. P. 1238–1253.
- Bondur V.G., Tsidilina 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. V. 485. Part 2. P. 461–464. <https://doi.org/10.1134/S1028334X19040202>.
- Bondur V.G., Voronova O.S., Cherepanova E.V., Tsidilina M.N., Zima A.L. Spatiotemporal Analysis of Multi-Year Wildfires and Emissions of Trace Gases and Aerosols in Russia, Based on Satellite Data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020a. V. 56. № 12. P. 1457–1469. <https://doi.org/10.1134/S0001433820120348>.
- Bondur V.G., Voronova O.S., Gordo K.A., Zima A.L. Satellite Monitoring of the Variability of Wildfire Areas and Emissions of Harmful Gas Components into the Atmosphere for Various Regions of Russia over a 20-Year Period // *Doklady Earth Sciences*. 2021a. V. 500. Part 2. P. 890–894. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21100044>
- Bondur V.G., Voronova O.S., Gordo K.A., Zima A.L., Feoktistova N.V. Kosmicheskiy monitoring mnogoletnikh prirodnykh pozharov i obyemov vyzhyvayemykh imi emissiy vrednykh primesey v vozdushnuyu sredu Avstralii (Satellite Monitoring of Multiannual Wildfires and Related Harmful Trace Gas Emissions into the Air Environment of Australia) // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2021b. № 1. P. 25–40. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S0205961421010048>
- Bondur, V.; Chimtdorzhiev, T.; Kirbizhekova, I.; Dmitriev, A. Estimation of Postfire Reforestation with SAR Polarimetry and NDVI Time Series. *Forests* 2022, 13, 814. <https://doi.org/10.3390/f13050814>
- Canadell J.G., Raupach M.R. Managing forests for climate change mitigation. *Science* (New York, N.Y.), 2008.

- 320(5882), 1456–1457.  
<https://doi.org/10.1126/science.1155458>
- Cattau M.E., Wessman C., Mahood A., Balch J.K.* Anthropogenic and lightning-started fires are becoming larger and more frequent over a longer season length in the U.S.A. *Global Ecol Biogeogr.* 2020; 29: 668–681.  
<https://doi.org/10.1111/geb.13058>
- Chen D., Pereira J.M.C., Masiero A., Pirotti F.* Mapping fire regimes in China using MODIS active fire and burned area data. *Appl. Geogr.* 2017, 85, 14–26.  
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.05.013>
- Chuvieco E., Giglio L., Justice C.* Global characterization of fire activity: toward defining fire regimes from Earth observation data. *Global Change Biology*, 2008. 14: 1488–1502.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01585.x>
- Desservetta M., et al.* Emission factors of trace gases and particles from tropical savanna fires in Australia // *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2017. 22, 6059–6074.  
<https://doi.org/10.1002/2016JD025925>
- Filkov A., Ngo T., Matthews S., Telfer S., Penman T.* Impact of Australia's catastrophic 2019/20 bushfire season on communities and environment. Retrospective analysis and current trends // *J. Safety Science and Resilience*. 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2020.06.009>
- Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A. et al.* (2010). MODIS Collection 5 global land cover: algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sens. Environ.* 114 (1), 168–182.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.016>
- 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. V. 217. P. 72–85.
- Giglio L., Schroeder W., Justice C.O.* The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // *Remote Sensing of Environment*. 2016. V. 178. P. 31–41.  
<https://doi.org/10.1071/WF03054>
- Houghton R.A., Nassikas A.A.* Global and regional fluxes of carbon from land use and land cover change 1850–2015 // *Global Biogeochemical Cycles*. 2017. T. 31. № 3. C. 456–472.  
<https://doi.org/10.1002/2016GB005546>
- 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>
- Kganyago M., Shikwambana L.* Assessment of the Characteristics of Recent Major Wildfires in the USA, Australia and Brazil in 2018–2019 Using Multi-Source Satellite Products. *Remote Sens.* 2020, 12, 1803.  
<https://doi.org/10.3390/rs12111803>
- 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>
- Molinario G., Davies D.K., Schroeder W., Justice C.O.* Characterizing the spatio-temporal fire regime in Ethiopia using the MODIS-active fire product: A replicable methodology for country-level fire reporting. *Afr. Geogr. Rev.* 2014, 33, 99–123.  
<https://doi.org/10.1080/19376812.2013.854708>
- Palumbo I., Grégoire J., Simonetti D., Punga M.* Spatio-temporal distribution of fire activity in protected areas of Sub-Saharan Africa derived from MODIS data. *Procedia Environ. Sci.* 2011, 7, 26–31.  
<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.07.006>
- Ponomarev Ye.I., Kharuk V.I., Yakimov N.D.* Rezultaty i perspektivy sputnikovogo monitoringa prirodnykh pozharov Sibiri (Current results and perspectives of wildfire satellite monitoring in Siberia) // *Siberian J. Forest Science*. 2017. № 5. P. 25–36.  
<https://doi.org/10.15372/SJFS20170503> (In Russian)
- Seiler W., Crutzen P.J.* Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere from biomass burning // *Clim. Change*. 1980. V. 2. № 3. P. 207–247.
- Shi Y., Yamaguchi Y.* (2014). A high-resolution and multi-year emissions inventory for biomass burning in Southeast Asia during 2001–2010. *Atmospheric Environment*, 98, 8–16.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.050>
- Shi Y., Zang S., Matsunaga T., Yamaguchi Y.* (2020). A multi-year and high-resolution inventory of biomass burning emissions in tropical continents from 2001–2017 based on satellite observations // *J. Cleaner Production*, 270, 122511.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122511>
- Vadrevu K.P., Lasko K., Giglio L. et al.* Trends in Vegetation fires in South and Southeast Asian Countries. *Sci. Rep.* 9, 7422 (2019).  
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-43940-x>
- Van Der Werf G.R., Randerson J.T., Giglio L., Van Leeuwen T.T., Chen Y., Rogers B.M., ... Kasibhatla P.S.* Global fire emissions estimates during 1997–2016. *Earth System Science Data*, 2017. 9(2), 697–720.  
<https://doi.org/10.5194/essd-9-697-2017>
- Van Der Werf G.R., Randerson J.T., Giglio L., Collatz G.J., Mu M., Kasibhatla P.S., Morton D.C., Defries R.S., Jin Y., Van Leeuwen T.T.* Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009). *Atmos. Chem. Phys.* 2010, 10, 11707–11711.  
<https://doi.org/10.5194/acp-10-11707-2010>
- Voronova O.S., Gordo K.A., Zima A.L., Feoktistova N.V.* Silnyye prirodnyye pozhary na territorii Rossii v 2021 g., obnaruzhennyye po kosmicheskim dannym (Strong Wildfires in Russia in 2021 Detected Using Satellite Data) // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*. 2022. № 1. P. 3–18. (In Russian).  
<https://doi.org/10.31857/S0205961422010080>
- 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 Sensing*. 2020; 12(11): 1787.  
<https://doi.org/10.3390/rs12111787>
- 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>