

Сравнительный анализ оценок эмиссии углерода от природных пожаров на территории России на основании глобальных продуктов ДЗЗ

А. М. Матвеев, С. А. Баргалева

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: matveevhwre@gmail.com*

Настоящая работа посвящена сравнительному анализу применения существующих глобальных информационных продуктов по оценке эмиссии климатически активных веществ, образующихся в результате природных пожаров, для оценки пирогенной эмиссии углерода на территории России за 1997–2023 гг. В рассмотрение были включены следующие продукты, разработанные с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ): GFAS v1.2, GFED v4.1s, FEER v1.0-GFAS v1.2, FINN v2.5, QFED v2.5-r1. В зависимости от продукта среднегодовое вклада России в мировую пирогенную эмиссию углерода составляет 6–11 %, или 130–275 Тг С (3,5–7,5 % при учёте только лесных пожаров). Ежегодная эмиссия углерода от природных пожаров варьируется в диапазоне от 54 до 490 Тг С в зависимости от продукта и уровня горимости в рассматриваемом году, с максимальными значениями в годы экстремально больших пожаров (2003, 2008, 2012, 2021 гг.). На лесные пожары приходится 53–72 % от суммарной пирогенной эмиссии углерода. Оценки эмиссии большинства из рассмотренных продуктов превосходят официальные отчётные данные для лесных пожаров, в которых учитываются только пожары на территории управляемых лесов (среднегодовое значение 80 Тг С). За период наблюдений 2002–2023 гг. согласно рассмотренным продуктам ДЗЗ наблюдается рост эмиссии углерода от лесных пожаров (на +0,5 Тг С/год) и снижение эмиссии от пожаров на не покрытой лесом территории (–1,25 Тг С/год). Наблюдается высокая ($R^2 > 0,8$) взаимная согласованность ежегодных оценок эмиссии углерода согласно рассмотренным продуктам. Однако уровень показателя попиксельной корреляции оценок эмиссии углерода между различными продуктами значительно ниже ($R^2 = 0,22...0,44$, $p < 0,001$; пространственное разрешение 0,1°). Вклад в оценку пирогенной эмиссии от статических источников, не связанных с природными пожарами (в частности, газовых факелов на нефтегазовых объектах), оценивается как 0,5–6,6 % в зависимости от рассмотренного информационного продукта.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, природные пожары, эмиссия углерода

Одобрена к печати: 01.07.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-141-161

Введение

Определение объёмов эмиссии климатически активных веществ от природных пожаров в атмосфере является одной из важных задач оценки глобального и региональных бюджетов углерода лесных и других наземных экосистем. Согласно Национальному докладу о кадастре антропогенных выбросов и абсорбции поглотителями парниковых газов (далее Кадастр) (Национальный..., 2023), предоставляющему статистику только по управляемым лесам, среднегодовое значение эмиссии от лесных пожаров на территории России составляет 80 Тг С. Согласно результатам исследований с применением методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), среднегодовое значение эмиссии от лесных пожаров на территории России с начала XXI в. составляет 36,3 Тг С (Ершов, Сочилова, 2022), 68,5 Тг С (Бондур и др., 2022) или 82 Тг С (Shvidenko et al., 2011). Оценка среднегодовой эмиссии от лесных пожаров на территории Сибири (без Дальнего Востока) составляет 123 Тг С за 2002–2022 гг. (Ponomarev et al., 2023). Согласно исследованию, оценивающему потерю надпочвенной биомассы в лесах Азиатской части России за 2010–2019 гг., на пожары ежегодно приходится 100 ± 10 Тг С, или 62 % от общих потерь биомассы вследствие полной гибели лесов (Fan et al., 2023).

Вклад нелесных пожаров составляет около трети от общей пожарной эмиссии парниковых газов на территории России (Бондур и др., 2022; Shvidenko et al., 2011; Vivchar et al., 2010).

В зависимости от методики детектирования пожаров оценка площади пожаров на не покрытых лесом территории России различается: в случае продуктов детектирования гарей площадь нелесных пожаров превалирует над площадью лесных пожаров (64 тыс. км² против 38 или 48 тыс. км²) (Барталев и др., 2012; Бондур и др., 2022), тогда как в случае фиксации активного горения площадь нелесных пожаров оказывается ниже (44 тыс. км² против 57 тыс. км²) (Лупян и др., 2017). Более низкая оценка площади нелесных пожаров на основе фиксации активного горения, вероятно, связана с наличием значительного числа пропусков в силу быстрого распространения и краткой длительности пожаров вне лесной зоны. Региональные исследования на территории России показывают, что пожары травяных экосистем отличаются высокой площадью и повторяемостью (Шинкаренко и др., 2022; Ostroukhov et al., 2022). В сравнении с лесными пожарами эти факторы могут приводить к высоким объемам средне-многолетней абсолютной эмиссии углерода при более низких показателях однолетней удельной эмиссии.

Цель настоящей работы — обзор существующих глобальных информационных продуктов, разработанных на основе спутниковых данных ДЗЗ для оценки объемов эмиссии климатически активных веществ, образующихся в результате природных пожаров на территории России. В обзоре рассмотрены оценки, полученные с помощью следующих глобальных продуктов: GFAS v1.2 (англ. Global Fire Assimilation System) (Kaiser et al., 2012), FINN v2.5 (англ. Fire INventory from National Center for Atmospheric Research) (Wiedinmyer et al., 2023), FEER v1.0-GFAS1.2 (англ. Fire Energetics and Emissions Research), или FEER v1.0-G1.2 (Ichoku, Ellison, 2014), QFED v2.5-r1 (англ. Quick Fire Emissions Dataset) (Darmenov, da Silva, 2015), GFED v4.1s (англ. Global Fire Emissions Database) (van der Werf et al., 2017). Характеристики рассматриваемых глобальных информационных продуктов представлены в табл. 1. На момент после проведения исследования в рамках бета-версий были опубликованы продукты GFFEPS (англ. Global Forest Fire Emissions Prediction System) (Anderson et al., 2024) и GFED v5 (Chen et al., 2023).

Таблица 1. Характеристика глобальных информационных продуктов оценки пирогенной эмиссии климатически активных веществ с применением ДЗЗ

Продукт ДЗЗ	Сенсоры	Период, временное разрешение, день	Пространственное разрешение	Компоненты эмиссии	Исходные данные ¹
GFAS v1.2 (Kaiser et al., 2012)	MODIS ⁷	2003–08.2023	0,1°	C, CO ₂ , CO, CH ₄ , BC, OC; +32 поллютанта	https://ads.atmosphere.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/cams-global-fire-emissions-gfas?tab = form
FINN v2.5² (Wiedinmyer et al., 2023)	MODIS VIIRS ⁸	2002–2021 ³	0,1°; 1 км	CO ₂ , CO, CH ₄ , BC, OC; +22 поллютанта	https://rda.ucar.edu/datasets/ds312.9/dataaccess/
FEER v1.0-GFAS1.2 (Ichoku, Ellison, 2014)	MODIS	2003–08.2023	0,1°	C, CO ₂ , CO, CH ₄ , BC, OC; +24 поллютанта	https://feer.gsfc.nasa.gov/data/emissions/
QFED v.2.5r1⁴ (Darmenov, da Silva, 2015)	MODIS	2000–02.2023	0,1°	CO ₂ , CO, CH ₄ , BC, OC; +12 поллютантов	https://portal.nccs.nasa.gov/datashare/iesa/aerosol/emissions/QFED/v2.5r1/0.1/QFED/monthly/
GFED v4.1s^{5,6} (van der Werf et al., 2017)	VIRS ⁹ (1997–2001) MODIS	1997–08.2023	0,25°	C; CO ₂ , CO, CH ₄ , BC, OC; +34 поллютанта	https://www.geo.vu.nl/~gwerf/GFED/GFED4/

¹ В работе использованы данные по состоянию доступности на сентябрь 2023 г.

² В работе использованы данные ~1 км версии продукта FINN v2.5.

³ Оперативные данные FINN v2.5.1 доступны на период с 2018 г. по настоящее время. В работе оперативные данные не использовались.

⁴ С марта 2023 г. версия продукта GFED обновлена до v2.6 (не использована в работе).

⁵ Существует версия GFED 0,5 км с ежемесячными данными за 2002–2020 гг. (van Wees et al., 2022). В ней значительно выросла оценка эмиссии в Бореальной Азии (на 58 %).

⁶ С 2017 г. используется бета-версия GFED v4.1s с опорой на продукт детектирования активного горения MCD14 вместо детектора гарей MCD64A1.

⁷ MODIS — *англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.

⁸ VIIRS — *англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite.

⁹ VIRS — *англ.* Visible and Infrared Scanner.

В рамках исследования были рассмотрены следующие характеристики: вклад пожаров на территории России в глобальную пирогенную эмиссию углерода, среднемноголетняя и средняя ежемесячная динамика объёмов эмиссии, распределение эмиссии по классам растительного покрова России.

Методика

Краткое описание принципов оценки объёмов эмиссии по данным ДЗЗ

Расчёт массы эмиссии климатически активных веществ основан на оценке сгоревшей биомассы DM и коэффициенте эмиссии компонента по модифицированной формуле Сейлера – Крутцена (Seiler, Crutzen, 1980):

$$M_s = AB\beta E_s, \quad (1)$$

где M_s — масса эмиссии компонента S , кг; A — площадь пожара, m^2 ; B — плотность биомассы, kg/m^2 ; β — полнота сгорания биомассы, %; E_s — коэффициент эмиссии компонента S , kg/kg . Сгоревшая доля биомассы DM (в кг), таким образом, выражена в уравнении как $AB\beta$.

Модифицированная версия данного подхода основана на измерении мощности теплового излучения FRP (*англ.* Fire Radiative Power) в среднем инфракрасном диапазоне. Для нахождения массы эмитированных поллютантов применяется коэффициент α (в $kg/MДж$) перевода FRP в сгоревшую биомассу DM , определяемый путём калибровки по данным других продуктов или эмпирически, например, коэффициент М. Дж. Вустера с соавторами (Wooster et al., 2005), равный $0,368 \pm 0,015$ $kg/MДж$. При использовании FRP эмиссия оценивается по формуле:

$$M_s = \alpha \cdot FRP \cdot E_s, \quad (2)$$

В *табл. 2* представлены источники данных, являющиеся основой для рассматриваемых продуктов по оценке эмиссии от природных пожаров.

Для создания большинства рассмотренных продуктов информация о местоположении, времени возникновения и энергетических характеристиках пожаров получается по данным спутникового спектрорадиометра MODIS. Для построения продукта GFED v4.1s в период до 2000 г. применяются данные наблюдения сенсора VIIRS. При формировании продукта FINN v2.5 используется информация об активном горении, полученная на основе комбинации данных MODIS и VIIRS.

Для построения всех рассмотренных информационных продуктов в качестве карты растительного покрова использован стандартный продукт MODIS MCD12Q1, основанный на классификациях IGBP (*англ.* International Biosphere-Geosphere Program) или UMD (*англ.* University of Maryland), при различных уровнях пространственной агрегации данных. Для создания информационных продуктов GFED v4.1s и FINN v2.5 с характеристиками проективного покрытия лесной растительности используется стандартный продукт MODIS MOD44B.

В основу получения продукта GFED v4.1s положено использование данных по пройденным пожарами территориям MODIS MCD64A1 для оценки площади A . Для данной версии

продукта (v4.1s) дополнительно используются данные об активном горении согласно MODIS MOD14/MYD14 для оценки доли неучтённых малых пожаров. Удельная биомасса B рассчитывается по модели CASA (англ. Carnegie – Ames – Stanford Approach) и впоследствии калибруется по имеющимся исследовательским данным полевых экспериментов (van Leeuwen et al., 2014) и карте биомассы тропических лесов (Avitabile et al., 2016). Коэффициент полноты сгорания биомассы β для каждого пула (листья, корни, мортмасса) рассчитывается отдельно. Для бореальных лесов оценка коэффициента β проводится с применением рассчитанных по данным MODIS спектральных и температурных индексов dNBR (англ. difference Normalized Burned Area), NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index) и LST (летняя) (англ. Land Surface Temperature).

Таблица 2. Источники данных, использованные при получении оценок пирогенных эмиссий климатически активных веществ

Продукты данных по эмиссии ¹	Продукты данных о характеристиках пожаров	Карты растительного покрова	Плотность растительной биомассы B	Коэффициенты эмиссии E_S
GFED v4.1s (1)	MCD64A1 C5.1 MCD14ML C5.1 (small fires)	MCD12Q1 (UMD) (предыдущий год, 500 м) MOD44B (предыдущий год, 0,25°)	Модель CASA, калибровка по (Avitabile et al., 2016; van Leeuwen et al., 2014)	(Akagi et al., 2011; Andreae, Merlet, 2001)
FINN v2.5 (1)	MCD14DL C6 VNP14 (NASA FIRMS ²)	MCD12Q1 (IGBP) MOD44B C6 (предыдущий год, 0,25°)	(van Leeuwen et al., 2014)	(Akagi et al., 2011; Urbanski, 2014)
GFAS v1.2 (2)	MOD14/MYD14 Collection 6	По GFED v3.1	–	(Andreae, Merlet., 2001; Christian et al., 2003)
FEERv1.0-GFAS1.2 (2)	MOD14/MYD14 Collection 5	MCD12 (IGBP) (2004 г., 0,5°)	–	(Andreae, Merlet, 2001)
QFED v.2.5r1 (2)	MOD14/MYD14 Collection 5	MCD12 (IGBP-INPE ³) (предыдущий год, 1 км)	–	(Andreae, Merlet, 2001)

¹ В скобках указана формула расчёта объёмов пирогенной эмиссии.

² FIRMS — англ. Fire Information for Resource Management System.

³ INPE — англ. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Для формирования информационного продукта FINN v2.5 данные о пожарах получаются на основе MODIS MCD14L и VIIRS VNP14 (продукты NASA (англ. National Aeronautics and Space Administration) FIRMS). Площадь A определяется как полная площадь пикселя, содержащего температурную аномалию, без учёта геометрии съёмки (Wiedinmyer et al., 2023). Соседние пиксели с наличием температурных аномалий при этом агрегируются в единый контур пожара. Данные по FRP не используются.

В продуктах, опирающихся на FRP по MODIS MOD14/MYD14 (GFAS v1.2, QFED v2.5-r1), калибровочные коэффициенты перевода α (см. формулу (2)) рассчитываются путём калибровки FRP по оценкам сгоревшей биомассы DM на основе продукта GFED по отдельным регионам или растительным биомам. В продукте QFED применяется оценка оптической толщины аэрозолей (MOD04 AOT (англ. Aerosol Optical Thickness)) для дополнительной калибровки региональных коэффициентов α . В продукте FEER v1.0-GFAS v1.2 используются значения FRP из продукта GFAS v1.2, а данные об AOT используются для оценки коэффициентов эмиссии E_S аэрозолей (ТрМ, англ. Total Particulate Matter) в ячейках $1 \times 1^\circ$. Объёмы эмиссии остальных типов климатически активных веществ в FEERv1.0-G1.2 определяются пропорционально коэффициентам, опубликованным по результатам ранее проведённых исследований (Andreae, Merlet, 2001).

В отдельных работах (Барталев и др., 2012; Бондур и др., 2022; Chen et al., 2023) предложено использование корректирующего коэффициента n для оценок площади A на основе наблюдений сенсоров низкого пространственного разрешения (MODIS) с применением оценок площади гарей по изображениям более высокого пространственного разрешения (со спутников Landsat-8, Sentinel-2) для тестовых пожаров ($n = 1, 3 \dots 1, 6$ в зависимости от биома). В работе Е. И. Пономарёва с соавторами (Ponomarev et al., 2023) предложено разделение лесных пожаров по классам повреждения на основе корреляции значений FRP и dNBR. При этом различным классам повреждения лесов пожарами соответствуют различные значения полноты сгорания биомассы β и коэффициентов эмиссий E_g . В исследовании (Ершов, Соколова, 2022) характер пожара определяется с применением наблюдений гарей и категории состояния на основе данных сенсора MODIS и данных государственного учёта лесного фонда для оценки запасов горючих материалов по пулам биомассы.

Методика обработки данных

Все используемые в исследовании информационные продукты предоставляют ежедневные данные об объёмах пирогенной эмиссии (в GFED v4.1s требуется перерасчёт на основании ежедневной доли эмиссии). Анализ данных проводился после агрегации данных по месяцам. Исходное пространственное разрешение продуктов было оставлено без изменений. Извлекались только данные по пикселям, центроиды которых с учётом пространственного разрешения продукта находятся в пределах территории России и значения эмиссии в которых не равны нулю.

В случае продукта FINN v2.5 были обработаны обе доступные версии данных: ~ 1 км (соответствует разрешению детекторов пожаров MCD14DP/VNP14) и агрегированная до $0,1^\circ$ версия продукта. В результатах настоящей работы представлены данные FINN v2.5 1 км; различие в оценке двух версий продукта не превышает 1% .

В большинстве продуктов оценки эмиссии представлены в виде удельного потока эмиссии, характеризующего массу климатически активного вещества, эмитированного в результате пожара в атмосферу с единицы площади земной поверхности за единицу времени (в $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$). Для получения массы эмиссии M_g использовалось произведение удельного потока эмиссии, времени и площади ячейки сетки.

Для всех продуктов подсчитывалась масса ежегодной и ежемесячной эмиссии CO_2 , CO , CH_4 , органического и чёрного углерода (OC и BC, *англ.* organic и black carbon), а также суммарной эмиссии углерода. Для продуктов, которые не предоставляют прямую оценку эмиссии углерода (FINN v2.5 и QFED v2.5-r1), по аналогии с используемым в продукте GFAS v1.2 методом, масса эмитированного углерода M_c была рассчитана на основе его доли в атомарной массе компонентов CO_2 , CO , CH_4 , OC и BC по формуле:

$$M_c = \frac{12M(\text{CO}_2)}{12 + 2 \times 16} + \frac{12M(\text{CO})}{12 + 16} + \frac{12M(\text{CH}_4)}{12 + 4} + M(\text{OC}) + M(\text{BC}),$$

где M — атомарная масса вещества.

Для анализа распределения эмиссии по типам растительного покрова России использовалась карта с пространственным разрешением 230 м (Барталев и др., 2016), трансформированная в географическую систему координат рассмотренных продуктов с соответствующим пространственным разрешением и присвоением ячейкам регулярной сети наиболее часто встречающегося класса растительности. При этом присвоение ячейкам класса проводилось с использованием карты растительного покрова за предшествующий пожару год. В случае FINN v2.5 исходные точечные данные продукта были пространственно агрегированы и перепроецированы в систему координат карты растительного покрова России.

В настоящей работе получение и обработка данных проводилась с помощью библиотек языка Python. Пример получения и обработки исходных данных рассмотренных продуктов ДЗЗ с применением программного обеспечения R и доступным исходным кодом на GitHub представлен в работе (Liu et al., 2020).

Результаты

Многолетние тренды эмиссии углерода от природных пожаров

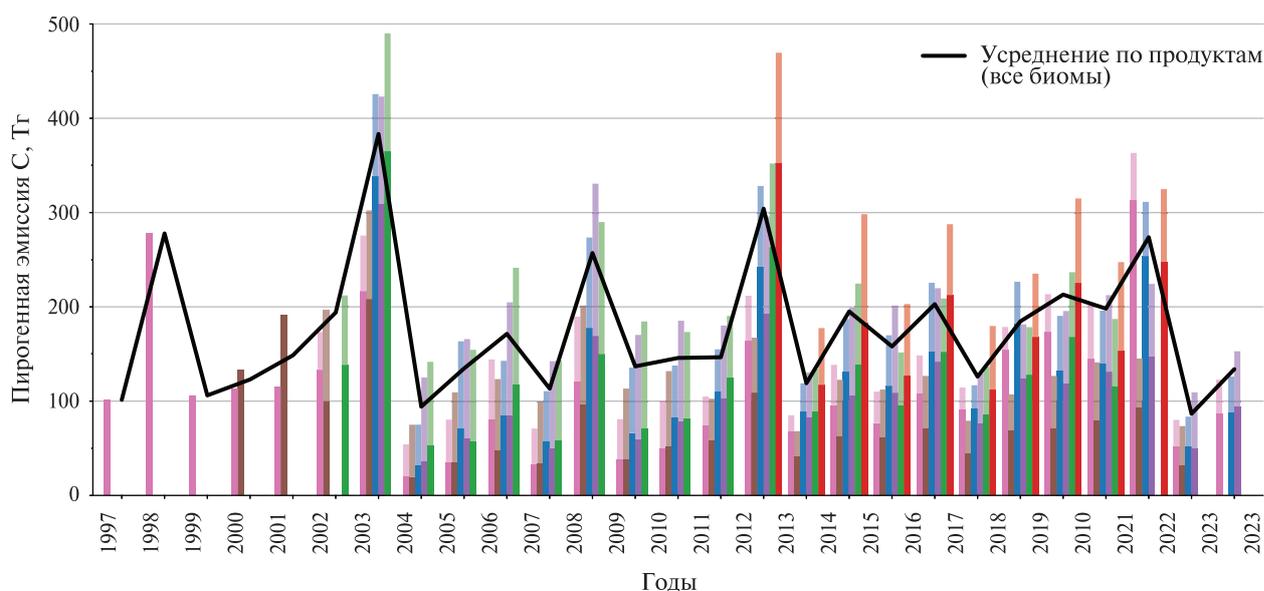
Согласно продуктам GFAS v1.2 и GFED v4.1s, вклад природных пожаров на территории России в ежегодную глобальную эмиссию углерода от пожаров составляет от 2,5 до 17,9 % в зависимости от года (наибольший вклад приходился на 2003 и 2021 гг.). Среднемноголетний вклад России в глобальную эмиссию от пожаров составляет 5,9–10,8 % в зависимости от рассмотренного продукта ДЗЗ (минимум согласно FEER v1.0-G1.2, максимум согласно GFAS v1.2). Вклад лесных пожаров России в общую глобальную эмиссию составляет 3,3–7,4 %. По рассмотренным компонентам эмиссии доля России составляет 6–10 % (CO₂), 6,5–15 % (CO) или 7,5–18 % (чёрный и органический углерод в сумме, BC + OC).

Динамика объёмов ежегодной эмиссии углерода на территории России представлена на рис. 1а (см. с. 147) и в табл. 3.

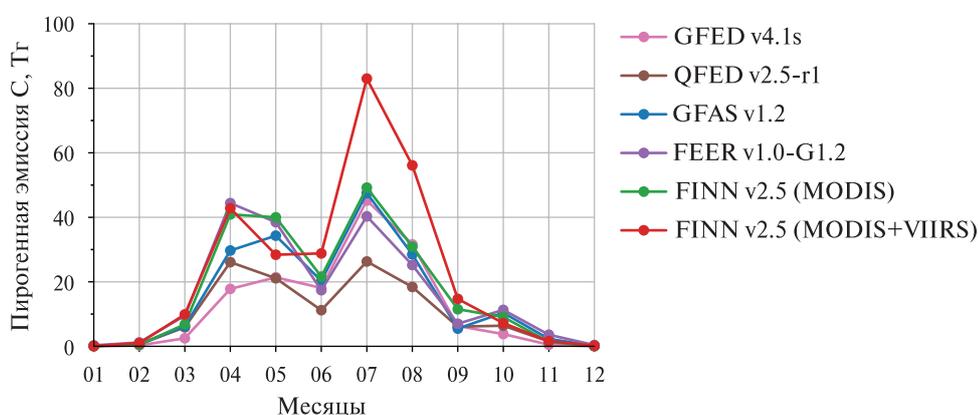
Таблица 3. Ежегодная оценка эмиссии углерода (в Тг С) от природных пожаров на территории России согласно глобальным продуктам ДЗЗ

Год	GFAS v1.2	FINN v2.5 MODIS	FINN v2.5 MODIS и VIIRS	FEER v1.0-G1.2	QFED v2.5-r1	GFED v4.1s
1997	–	–	–	–	–	101,4
1998	–	–	–	–	–	277,8
1999	–	–	–	–	–	106,1
2000	–	–	–	–	133,0	113,0
2001	–	–	–	–	191,3	115,3
2002	–	212,1	–	–	196,7	173,3
2003	425,7	490,0	–	423,0	302,3	275,6
2004	75,1	141,7	–	125,1	74,9	54,1
2005	163,5	154,4	–	165,8	109,3	80,4
2006	142,8	241,4	–	204,8	123,4	144,3
2007	110,6	143,1	–	142,4	99,3	70,9
2008	273,6	289,9	–	330,6	201,4	189,7
2009	135,6	184,5	–	170,2	113,3	80,9
2010	137,8	173,4	–	185,3	131,8	100,7
2011	154,9	190,4	–	180,2	102,5	104,9
2012	328,2	352,0	469,5	295,8	167,3	211,7
2013	118,9	134,0	177,5	130,5	68,1	85,1
2014	187,1	224,7	298,3	199,1	122,6	138,5
2015	169,9	151,6	202,9	201,3	112,3	110,1
2016	225,5	208,9	287,6	219,8	126,8	148,4
2017	116,9	136,4	179,7	129,6	79,2	114,4
2018	226,6	178,4	235,2	181,4	107,2	178,7
2019	190,4	236,7	315,0	195,6	126,8	213,4
2020	195,9	187,1	247,4	212,4	141,1	204,8
2021	311,3	–	324,8	224,3	145,2	363,3
2022	83,6	–	–	109,3	73,5	80,1
2023*	126,0	–	–	152,9	–	122,7
Среднее:	185,7	212,1	273,8	199,0	132,6	146,7

* Представлены эмиссии углерода по состоянию на август 2023 г.



а



б

Рис. 1. Ежегодная эмиссия углерода от природных пожаров на территории России согласно глобальным продуктам ДЗЗ (а). Полупрозрачными оттенками отмечены эмиссии от пожаров вне лесной зоны. Динамика усреднённой ежемесячной эмиссии углерода на территории России (б)

Среднемноголетние значения эмиссии углерода за 2003–2021 гг. варьируют в диапазоне 129–212 Тг С в зависимости от рассматриваемого продукта (274 Тг С в случае FINN v2.5 MODIS и VIIRS за 2012–2021 гг.). Порядок и динамика полученных на основе различных информационных продуктов ежегодных оценок пирогенной эмиссии углерода наземных экосистем России характеризуются высоким уровнем согласованности. Пиковые значения эмиссии совпадают с годами максимальной активности лесных пожаров и площади погибших лесов на территории России (2003, 2008, 2012, 2021 гг.) (Бондур и др., 2022; Лупян и др., 2022; Стыценко, Барталев, 2023).

Среднемноголетние ежемесячные оценки эмиссии углерода (рис. 1б) имеют два пика: весенний (апрель–май), соответствующий пожарам вне лесной зоны и низкоинтенсивным лесным пожарам, и летний (июль–август), соответствующий лесным пожарам с высокой летальностью. Эти сезоны были выделены в работах (Барталев и др., 2015; Shvidenko et al., 2011).

Согласно усреднённой оценке по данным всех использованных глобальных продуктов ДЗЗ, среди регионов России за период 2003–2021 гг. наибольшие показатели эмиссии наблюдаются на территориях Республики Саха (Якутия) (40 Тг С), Красноярского края (21,4 Тг С), Амурской обл. (17,1 Тг С), Забайкальского края и Иркутской обл. (по 16,75 Тг С), Хабаровского края (11,2 Тг С) и Республики Бурятия (10 Тг С).

Корреляция оценок пирогенной эмиссии углерода по данным различных глобальных продуктов ДЗЗ

В табл. 4 представлены взаимные коэффициенты детерминации R^2 оценок эмиссии углерода между рассмотренными продуктами ДЗЗ для территории России. Для оценки взаимной корреляции использовались ежегодные суммарные объёмы эмиссии по каждой ячейке пространственного разрешения $0,1^\circ$, для которой существуют оценки рассматриваемой пары продуктов, отдельно для каждого года. В случае FINN v2.5 была использована версия продукта с разрешением $0,1^\circ$. Статистика по GFED v4.1s в силу более низкого пространственного разрешения данных ($0,25^\circ$) не учитывалась.

Таблица 4. Коэффициенты детерминации R^2 оценок эмиссии углерода от природных пожаров на территории России по данным различных глобальных продуктов ДЗЗ: ежегодные значения для сетки с пространственным разрешением $0,1^\circ$

R^2	FEER v1.0-G1.2	FINN v2.5 MODIS	FINN v2.5 MODIS и VIIRS	GFAS v1.2	QFED v2.5-r1
FEER v1.0-G1.2	–	0,266	0,222	0,368	0,305
FINN v2.5 MODIS	0,266	–	0,974	0,302	0,419
FINN v2.5 MODIS и VIIRS	0,222	0,974	–	0,269	0,421
GFAS v1.2	0,368	0,302	0,269	–	0,311
QFED v2.5-r1	0,305	0,419	0,421	0,311	–

Для попиксельных оценок эмиссии наблюдается слабая корреляция оценок продуктов ($R^2 = 0,22...0,42$; $p < 0,001$). Исключение составляют две версии продукта FINN v2.5 с сильной взаимной корреляцией ($R^2 = 0,97$), однако в среднем оценки версии FINN 2.5 MODIS и VIIRS выше на 30 %. Наличие слабой корреляции можно объяснить влиянием различных подходов к пространственно-временной агрегации наблюдений FRP (GFAS, FEER, QFED), классификации растительности (как следствие — применение различных коэффициентов плотности биомассы B и эмиссии E_C) и региональной калибровки данных, а в случае FINN — использованием иного подхода по оценке эмиссии.

Следует отметить, что в большинстве корреляционных пар наблюдаются более высокие коэффициенты детерминации в случае отдельного рассмотрения сезонных пиков пожарной активности (апрель — май и июль — август). В случае корреляции по отдельным пикселям разрешения $0,1^\circ$ значение R^2 несколько выше для лесных пожаров по сравнению с нелесными, выделенными на основе карты растительного покрова, в среднем 0,44 против 0,34 соответственно.

Для суммарных ежегодных оценок по всей территории России наблюдается сильная ($R^2 > 0,8$) взаимная корреляция между большинством из рассмотренных продуктов. При этом корреляция с оценками GFED v4.1s значительно ниже ($R^2 = 0,3...0,7$), хотя данный продукт является калибровочным для продуктов на основе FRP.

Распределение эмиссии углерода по классам растительного покрова

На лесные пожары в среднем приходится около 60 % (52–73 % в зависимости от продукта), или 121,7 Тг С (67,5–129 Тг С) общей годовой эмиссии углерода. За период 2002–2023 гг. наблюдается возрастающий тренд эмиссии от лесных пожаров со средней скоростью прироста объёма эмитируемого углерода около +0,5 Тг С в год. Выделяются заметные пики объёма эмиссии углерода в годы повышенной пожарной активности в лесной зоне (2003, 2008, 2012 и 2021 гг.).

На рис. 2 представлено сопоставление ежегодных оценок эмиссии от лесных пожаров согласно Кадастру (Национальный..., 2023, табл. 6.7), продукту GFED v4.1s и исследованиям по территории России (Бондур и др., 2022; Ершов, Соколова, 2022; Ponomarev et al., 2023).

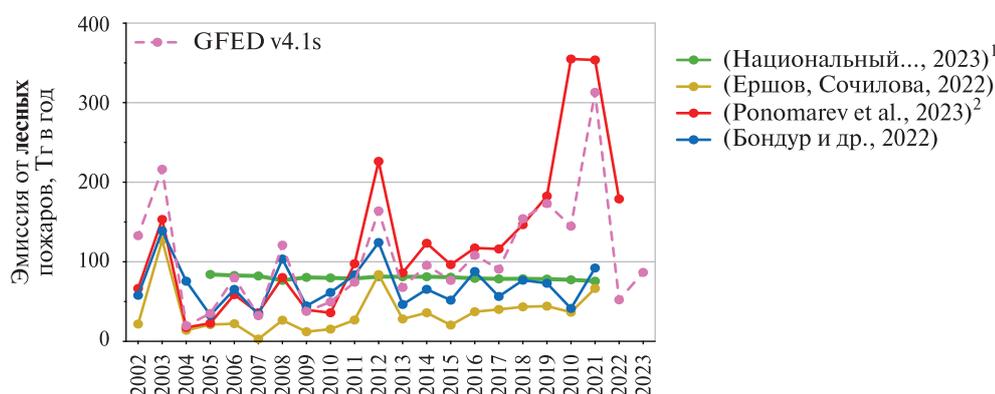


Рис. 2. Эмиссия углерода от лесных пожаров на территории России согласно Национальному докладу о кадастре антропогенных выбросов и абсорбции поглотителями парниковых газов (Национальный..., 2023) (Кадастр), тематическим исследованиям и продукту Д33 GFED v4.1s

¹ В данных Кадастра учитываются только управляемые леса.

² Рассмотрены эмиссии только по УрФО и СФО (Уральскому и Сибирскому федеральным округам), Республике Саха (Якутия), Бурятии, Забайкальскому краю

Как видно из графика (см. рис. 2), официальная статистика (Национальный..., 2023) предоставляет в среднем сопоставимые с другими источниками данные по эмиссии углерода от лесных пожаров, однако она не отражает межгодовые вариации. При этом необходимо учитывать, что данные официальной статистики отражают только эмиссию углерода от пожаров на территории так называемых «управляемых лесов». На неуправляемые леса России приходится 23,6 % площади лесов по данным Кадастра и 37 % от среднесезонной пирогенной эмиссии по всем биомам за 2004–2021 гг. по данным продукта GFAS (Национальный..., 2023; Romanov et al., 2022). Суммарные ежегодные оценки, представленные в работе Е. И. Пономарёва с соавторами (Ponomarev et al., 2023) имеют значимую корреляцию с оценками продукта GFED v4.1s ($R^2 = 0,72$) и фиксируют резкий рост эмиссии в 2021 г., однако в 2020 и 2022 гг. они значительно превышают данные рассмотренных продуктов и результатов региональных исследований. Вероятно, это связано с учётом вызванной пожарами степени повреждения лесов в цитируемой работе.

В мире, согласно глобальным оценкам, на нелесные пожары приходится 84,5 %, или 2,1 Пг С ежегодной эмиссии углерода с доминирующим (>1 Пг С) вкладом саванн (Xu et al., 2021). В России вклад нелесных пожаров в общую пирогенную эмиссию составляет 28–47,5 %, согласно глобальным продуктам Д33, или, по другим имеющимся оценкам в исследованиях (Бондур и др., 2022; Shvidenko et al., 2011; Vivchar et al., 2010), 35,5; 32,0 и 37,0 % соответственно. По данным глобальных продуктов Д33, за период 2002–2023 гг. в России наблюдается тренд снижения эмиссии от нелесных пожаров со среднегодовой величиной –1,25 Тг С в год. Пик эмиссии углерода от нелесных пожаров наблюдался в 2008 г. и составил, согласно усреднённой оценке по всем продуктам, около 112,5 Тг С.

На рис. 3 (см. с. 150) представлена средняя величина ежемесячной эмиссии углерода от природных пожаров на лесной (а) и не покрытой лесом (б) территориях России.

Лесные пожары на территории России характеризуются преобладанием в весенний период быстро распространяющихся низовых пожаров с относительно малой долей погибших лесов (13 %) и высокой долей интенсивных пожаров в летний период с высокой вероятностью гибели лесов (77 %) (Барталев и др., 2017; Лупян и др., 2022; Krylov et al., 2014). Наблюдаемая сезонная динамика объёма пирогенной эмиссии углерода соответствует описанному характеру лесных пожаров.

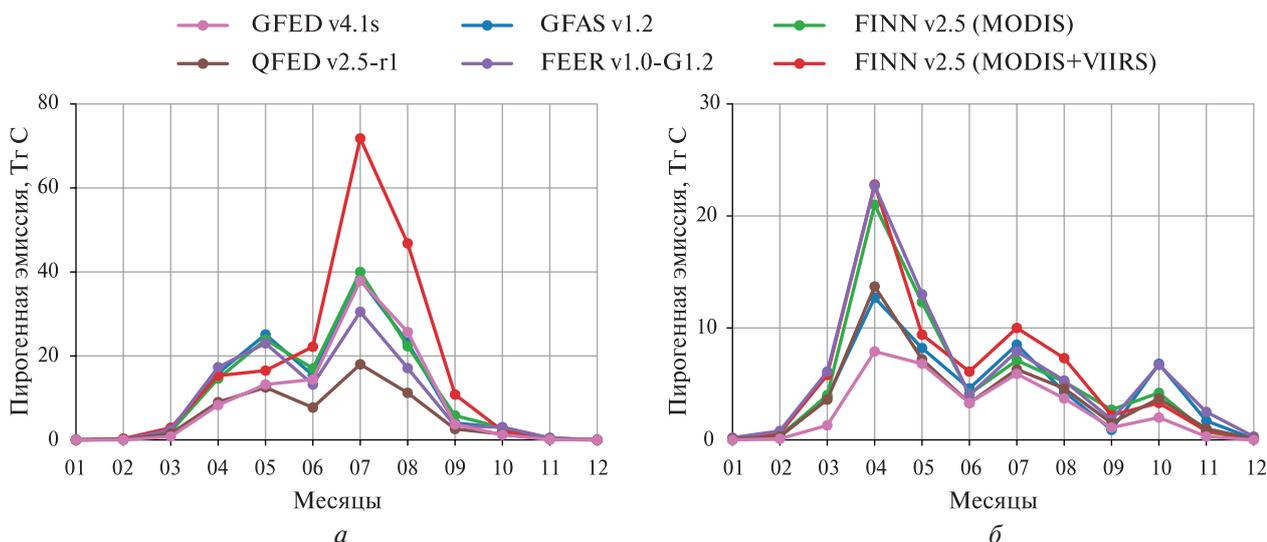


Рис. 3. Среднемесячная сезонная динамика объёмов пирогенной эмиссии углерода на территории России: а — леса; б — не покрытые лесом территории

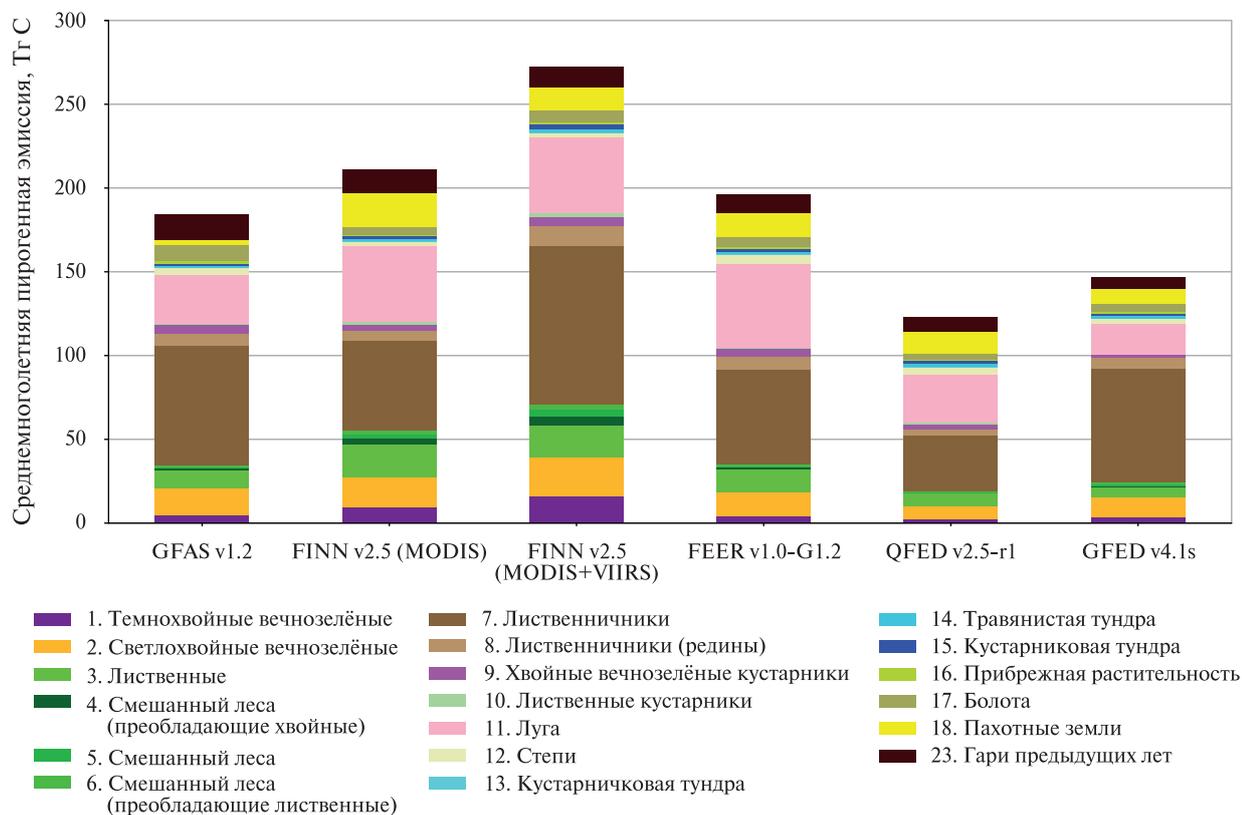


Рис. 4. Распределение среднесуточной пирогенной эмиссии углерода по типам растительности на территории России

Для нелесных пожаров характерен максимум эмиссии в апреле, причём абсолютные значения эмиссии углерода в этот период превышают соответствующие объёмы от лесных пожаров согласно всем рассматриваемым продуктам ДЗЗ. Этот пик, вероятно, связан с распространённой практикой проведения сельскохозяйственных палов после снеготаяния для очистки пастбищ от сухой травы и стимулирования их продуктивности (McCarty et al., 2017; Ostroukhov et al., 2022). На Дальнем Востоке также наблюдается второй осенний пик эмиссии углерода от пожаров на не покрытой лесом территории.

На *рис. 4* (см. с. 150) представлено среднегодовое распределение объёмов пирогенной эмиссии согласно рассмотренным продуктам ДЗЗ по отдельным типам растительного покрова на основании карты растительности Института космических исследований РАН.

Основная часть среднегодовой эмиссии углерода, согласно глобальным продуктам ДЗЗ, приходится на лиственничники (класс 7, 33 %), сосняки (класс 2, 8 %), лиственные леса (класс 3, 7 %). Среди нелесных биомов наибольшая доля эмиссии углерода наблюдается в результате луговых пожаров (класс 11, 19 %).

В сравнении с результатами Е. И. Пономарёва с соавторами (Ponomarev et al., 2021), среднегодовая оценка эмиссии углерода по рассмотренным глобальным продуктам ДЗЗ за 2002–2020 гг. демонстрирует сопоставимый уровень в случае лиственничников (48,8 против 43–52 Тг С) и сосновых лесов (11,8 против 11–12 Тг С), но показывает заметно более высокие значения в случае темнохвойных (4,9 против 1,9–3,1 Тг С) и смешанных лесов (8,2 против 3,8–5 Тг С).

Вклад статичных термоаномалий в оценку эмиссии углерода от природных пожаров

Стационарные (статичные) температурные аномалии (например, газовые факелы и др.) могут служить источником зашумления данных при оценке эмиссии углерода от природных пожаров. В некоторых глобальных продуктах или исследованиях фильтрация стационарных температурных аномалий проводится на этапе детектирования пожаров (Бондур и др., 2022; Kaiser et al., 2012; Wiedinmyer et al., 2023). В настоящем исследовании для фильтрации шума применялись контуры статичных термоаномалий согласно продукту VIIRS Nightfire (VNF) (Elvidge et al., 2023).

Выходными данными продукта VNF являются контуры статичных термоаномалий за 2012–2021 гг., фиксируемых с применением ближнего и среднего инфракрасного диапазонов ночной съёмки сенсора VIIRS на спутниках Suomi-NPP (*англ.* Suomi National Polar-orbiting Partnership) и NOAA-20 (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration). Источники стабильных термоаномалий были валидированы для территории России по изображениям высокого разрешения, причём ошибка автоматического обнаружения (*англ.* commission error) составила 4 % (Zhizhin et al., 2021). Контуры выявленных температурных аномалий, соответствующих одному объекту, объединялись. Всего на территории страны зафиксировано 2322 многолетние стационарные термоаномалии, из них около 76 % приходилось на газовые факелы на объектах нефтегазовой промышленности.

Результат фильтрации суммарных многолетних данных рассмотренных глобальных продуктов по оценке пирогенной эмиссии представлен в *табл. 5*. В силу более низкого пространственного разрешения и опоры на результаты детектирования гарей фильтрация для продукта GFED v4.1s не проводилась.

Таблица 5. Объёмы эмиссии углерода от природных пожаров по данным глобальных продуктов ДЗЗ, соответствующих стационарным температурным аномалиям

	GFAS v1.2	FINN v2.5 MODIS (1 км)	FINN v2.5 MODIS и VIIRS (1 км)	FEER v1.0-G1.2	QFED v2.5-r1
Эмиссия С, %	5,1	0,44	1,94	6,6	4,3

Проведённая оценка вклада статичных термоаномалий позволяет сделать вывод, что для большинства задач подобная фильтрация не является критичной, особенно для продукта FINN v2.5 на основе детекторов пожара MCD14L и VNP14 (NASA FIRMS).

Пример карты эмиссии от природных пожаров с фильтрацией ячеек с разрешением 0,1°, содержащих статичные термоаномалии, представлен на *рис. 5* (см. с. 152).

GFAS v1.2: пирогенная эмиссия в 2021 г., Гг С

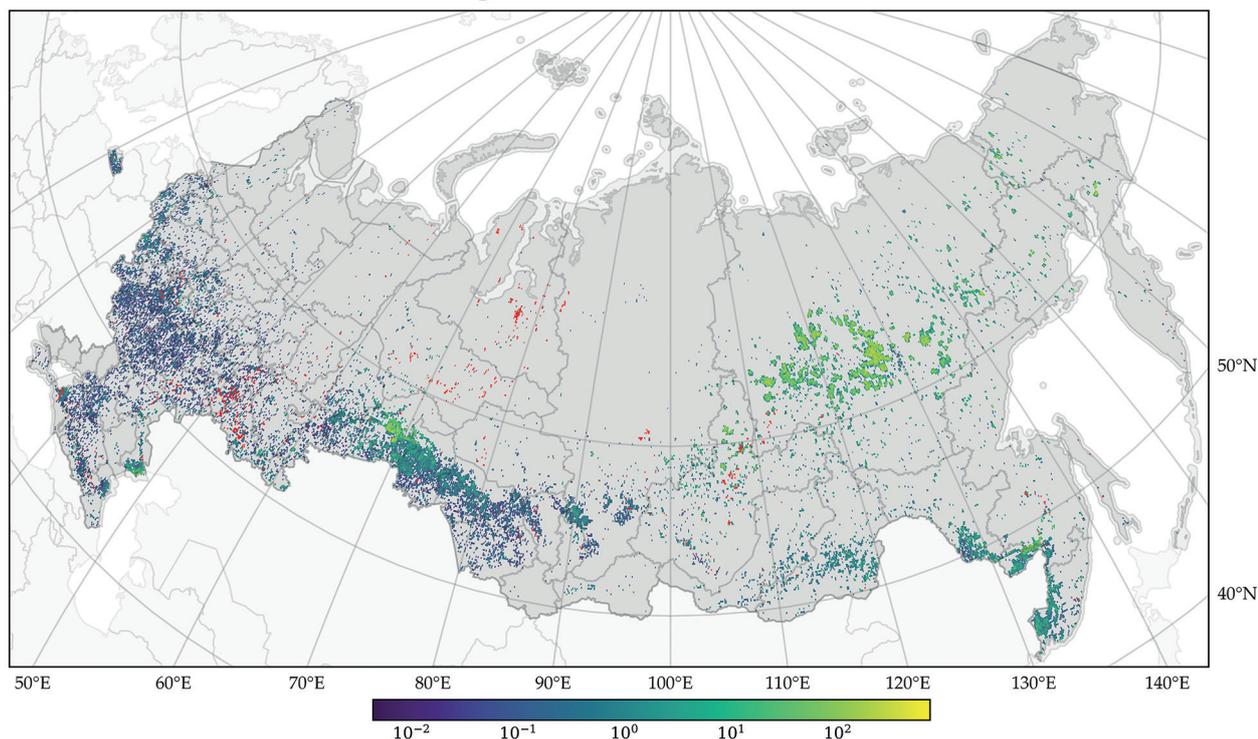


Рис. 5. Карта объёмов эмиссии углерода от пожаров в 2021 г. на территории России на примере продукта GFAS v1.2. Красным цветом выделены ячейки, соответствующие статичной термоаномалии VIIRS Nightfire (т. е. неприродные пожары)

Обсуждение результатов

Сравнительный анализ оценок объёмов эмиссии углерода в результате пожаров в наземных экосистемах России, полученных на основе имеющихся глобальных информационных продуктов, позволил выделить ряд проблем, ограничивающих возможности их эффективного использования, связанных с влиянием:

- погрешностей в исходных данных на результаты косвенной оценки эмиссии углерода;
- классификации растительного покрова на результаты оценки эмиссии углерода;
- низкого пространственного разрешения информационных продуктов.

Влияние погрешностей в исходных данных на результаты косвенной оценки эмиссии углерода

Все рассмотренные продукты основаны на использовании модифицированной методики косвенной оценки эмиссии углерода от пожаров (Seiler, Crutzen, 1980). Применяемый подход основывается на наличии прямой корреляции объёмов сгоревшей биомассы DM или мощности излучения FRP с результирующей эмиссией, что обуславливает зависимость точности получаемых оценок от погрешности определения этих входных параметров.

В случае использования формулы (1) (GFED v4.1s, FINN v2.5) оценка суммарной сгоревшей биомассы DM в первую очередь зависит от площади пожаров. Продукт GFED v4.1s в основном опирается на результаты выявления повреждённого огнём растительного покрова, в то время как продукт FINN v2.5 использует результаты детектирования действующих пожаров. При выявлении повреждённых огнём территорий характерна более высокая точность при оценке площадей крупных пожаров, в то время как по результатам выявления очагов горения более точно учитываются малые пожары (Liu et al., 2020). Согласно валидацион-

ным исследованиям, посвящённым стандартному продукту MCD64A1 C6, на долю пропусков (*англ.* omission error) приходится около 49–73 %, на долю ложно выявленных участков (*англ.* commission error) — около 19–40 %, причём для бореальных лесов отклонения наименьшие (Boschetti et al., 2019; Franquesa et al., 2022). Для FINN v2.5 на глобальном уровне характерна вдвое бóльшая оценка площади пожаров в сравнении с другими рассмотренными продуктами оценки пирогенной эмиссии (Anderson et al., 2024). Согласно разным версиям продукта GFED, значительно различается среднесреднегодная оценка пройденной огнём площади в России за 2002–2016 гг.: 77 тыс. км² согласно GFED v4, 139 тыс. км² согласно GFED v4.1s и 482 тыс. км² согласно бета-версии продукта GFED v5 (Chen et al., 2023). В бета-версии GFED v5 для учёта малых пожаров использовались дополнительные коэффициенты, полученные на основе наблюдений со спутников Sentinel-2 и Landsat.

Все рассмотренные глобальные продукты ДЗЗ, полученные с применением результатов оценки мощности излучения FRP (GFAS, FEER, QFED), так или иначе откалиброваны по данным продукта GFED, в силу чего в их оценки может быть заложена систематическая ошибка из этого источника. На оценки продуктов на основе FRP значительное влияние оказывает методика пространственно-временной агрегации данных, применяемая для учёта облачности и прерывистости наблюдений (Барталев и др., 2012; Liu et al., 2020). Использование исключительно наблюдений сенсора MODIS в рассмотренных продуктах ведёт к значительному недоучёту быстро распространяющихся или малых пожаров. Так, например, 38 % выявленной по данным VIIRS площади пожаров не фиксируется при использовании данных MODIS AFP (*англ.* Active Fire Product) (Liu et al., 2020).

Влияние классификации растительного покрова на результаты оценки эмиссии углерода

В зависимости от рассматриваемого продукта различным классам растительного покрова соответствуют разные табличные значения плотности биомассы B , полноты сгорания β и коэффициентов эмиссии E_s . Разница в значениях плотности распределения биомассы B для лесных и нелесных сообществ одной экологической зоны или региона может быть десятикратной и выше (Wiedinmyer et al., 2023); роль коэффициентов эмиссии значительно ниже (± 3 % на примере основного компонента эмиссии, CO₂) (Andreae, Merlet, 2001). В качестве примера на *рис. 6* (см. с. 154) показано распределение объёмов эмиссии углерода с использованием версии продукта FINN v2.5 по различным типам земного покрова на основе продукта MCD12Q1, классификация IGBP, и карты растительного покрова России (Барталев и др., 2016).

Как видно из графика на *рис. 6*, в случае лиственных лесов (класс 7 по карте растительного покрова России) бóльшая часть объёмов пирогенной эмиссии (согласно продукту FINN v2.5 MODIS, выделены цветом) приходится на классы травяно-кустарниковой растительности, а не на бореальные леса. В FINN v2.5 плотность биомассы B для бореальной Азии составляет 14,9 т/га для бореальных лесов, 11 т/га для кустарников (*англ.* shrubland) и 2,1 т/га для лугов (*англ.* grassland) (Wiedinmyer et al., 2023). Следовательно, эмиссии в лиственных лесах, классифицированных как shrubland, будут недооценены на 27 %, а их неверная классификация как лугов приведёт к занижению эмиссии в семь раз. В FINN v2.5 коэффициент удельной плотности биомассы B также различается между регионами: так, для лугов Восточной Европы используется коэффициент 1,61 т/га, что на 23 % ниже аналогичного коэффициента для Азиатской части России; это приводит к более низким оценкам удельной эмиссии для лугов Европейской части России.

На примере глобальных данных показано, что использование разных карт растительности (MCD12Q1 и GLC2000) и биомассы лесов (GEOCARBON и Globbiomass) приводит к значительному расхождению при оценке глобальной эмиссии CO₂ (35–43 % и 52,5–75 % соответственно) (Shiraishi et al., 2021, Table 2). Стоит отметить, что рассмотренные информационные продукты по оценке пирогенной эмиссии не используют глобальные карты биомассы.

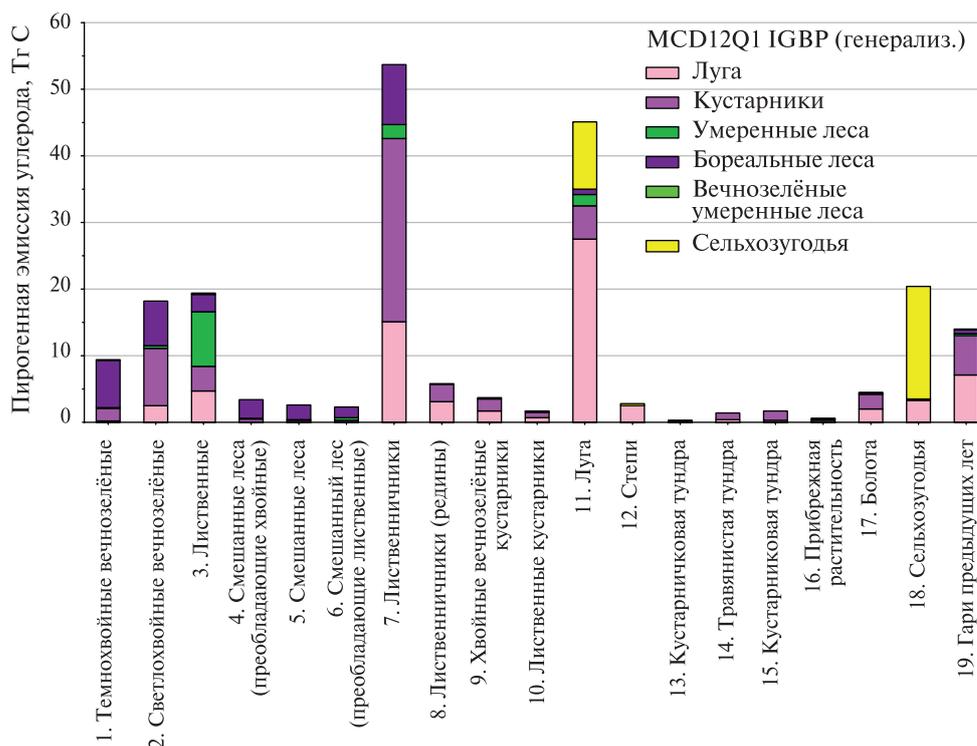


Рис. 6. Распределение среднемноголетней эмиссии углерода согласно продукту FINN v2.5 MODIS по классам карты растительного покрова России (Барталев и др., 2016) (подписи по горизонтальной оси) и глобальной карты MCD12Q1 IGBP (цветовая легенда)

Несмотря на указанные ранее проблемы, на примере экстремальных лесных пожаров в Канаде в 2023 г. была показана сопоставимость прямых оценок эмиссии CO с помощью сенсоров MOPITT и TROPOMI (англ. Measurements of Pollution in the Troposphere и Tropospheric Monitoring Instrument) с рассмотренными глобальными информационными продуктами GFAS v1.2, GFED v4.1s и QFED v2.6-r1 (Byrne et al., 2023).

Влияние низкого пространственного разрешения информационных продуктов

Рассмотренные продукты разработаны для применения в глобальных исследованиях, в силу чего их данные агрегируются до ячеек с пространственным разрешением $0,1^\circ$ ($0,25^\circ$ в случае GFED v4.1s). Столь низкое пространственное разрешение делает затруднительным применение такого рода данных для оценки эмиссий конкретных регионов или отдельных крупных пожаров, а также маскирование статичных термоаномалий, не связанных с природными пожарами. С более высоким пространственным разрешением на данный момент доступны продукты FINN v2.5 и GFED v4 (van Wees et al., 2022), однако в обоих продуктах отсутствует информация об интенсивности горения в виде параметра FRP.

Проблемы с оценкой итоговой эмиссии от пожаров можно представить на примере нелесных регионов России. Согласно продукту FINN v2.5 MODIS и VIIRS, среднемноголетний удельный поток эмиссии углерода от пожаров в луговых биотомах Дальнего Востока составляет 12,05 т/га. Эта оценка на порядок выше оценки 1,1–6 т/га для лугово-болотных биотомов Приамурья, полученной с применением наблюдений спутников серии Landsat с 1984 г. и полевых наблюдений (Ostroukhov et al., 2022). Причиной завышенной оценки эмиссии по данным продукта FINN v2.5 могут быть высокие значения удельной биомассы B (до 12,6 т/га), завышенные оценки площади пожара A (принимается равной площади пикселя при съёмке в надире) и значения доли сгорающей биомассы β для нелесных ландшафтов ($>90\%$).

По данным продукта GFED с пространственным разрешением 0,5 км (van Wees et al., 2022), среднемноголетний удельный поток пожарной эмиссии в лугах Дальнего Востока составляет 3,5 т/га.

Противоположным примером (недооценка) могут служить тростниковые сообщества дельты Волги (Астраханская обл.), обладающие высокими запасами фитомассы (ежегодный прирост составляет 5–7 т/га, а сырая биомасса может достигать 150–160 т/га) (Шинкаренко, Барталев, 2023; Шинкаренко и др., 2022). В проанализированных глобальных продуктах оценки эмиссии по Астраханской обл. не выделяются высокими значениями за исключением продукта FEER v1.0-G1.2. Пожары в дельте Волги характеризуются высокой степенью задымления (Шинкаренко и др., 2022), чем, вероятно, объясняются заметно более высокие оценки продукта FEER, в котором применяется калибровка значений FRP и оптической плотности аэрозолей по MODIS AOT. Более высокие оценки FEER, отличающиеся лучшей корреляцией с оценками методики, разработанной для сенсора SEVIRI (*англ.* Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) на борту геостационарного метеоспутника Meteosat, был также отмечен для шрабов и саванн в Южной Африке (Mota, Wooster, 2018).

Выводы

Проведённое исследование показало применимость большинства из рассмотренных глобальных продуктов ДЗЗ для оценки величины и динамики объёмов эмиссии углерода от пожаров в наземных экосистемах России. Суммарные ежегодные оценки эмиссии глобальных продуктов по всей территории страны обладают значительной корреляцией ($R^2 \approx 0,8$) между собой и сопоставимы с отчётными данными по эмиссиям от лесных пожаров (Национальный..., 2023) и результатами исследований по территории России (Бондур и др., 2022; Ершов, Сочилова, 2022; Ponomarev et al., 2023; Shvidenko et al., 2011; Vivchar et al., 2010). Однако несмотря на использование сходных источников информации в качестве исходных данных (см. табл. 2), взаимная корреляция оценок продуктов по конкретным ячейкам разрешением 0,1° значительно ниже ($R^2 = 0,22...0,44$).

В соответствии с сезонным характером горимости на территории России в динамике пирогенной эмиссии ожидаемо проявляются весенний и летний пики, ассоциированные с нелесными пожарами (весна) и высокоинтенсивными лесными пожарами (лето).

В случае лесных пожаров наблюдаются сопоставимые оценки эмиссии углерода между глобальными продуктами, исследованиями по территории России (от 40 до 130 Тг С) и данными Кадастра антропогенных выбросов и абсорбции поглотителями парниковых газов (80 Тг С). Однако данные официальной отчётности не отражают значительную межгодовую вариабельность эмиссии. На нелесные пожары на территории России согласно глобальным продуктам ДЗЗ и региональным исследованиям приходится от 28 до 47,5% общей пожарной эмиссии углерода. По усреднённым данным глобальных продуктов ДЗЗ за 2002–2023 гг., наблюдается возрастающий тренд эмиссии от лесных пожаров (+0,5 Тг С в год) и снижение объёмов эмиссии от нелесных пожаров (–1,25 Тг С в год).

Кроме того, проведённое исследование показало, что погрешность, вносимая стационарными температурными аномалиями (газовые факелы и др.) в оценку пирогенных эмиссий углерода, колеблется в диапазоне 0,5–6,6 % в зависимости от используемого глобального продукта.

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учёта данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (регистрационный № 123030300031-6) с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019) (<http://ckp.geosmis.ru/>).

Литература

1. Барталев С. А., Егоров В. А., Ефремов В. Ю., Лупян Е. А., Стыщенко 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. 9–26.
2. Барталев С. А., Стыщенко Ф. В., Егоров В. А., Лупян Е. А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
3. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
4. Барталев С. А., Стыщенко Ф. В., Хвостиков С. А., Лупян Е. А. Методология мониторинга и прогнозирования пирогенной гибели лесов на основе данных спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 176–193. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193.
5. Бондур В. Г., Гордо К. А., Зима А. Л. Исследование из космоса последствий природных пожаров на территории России для разных типов растительного покрова // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 6. С. 74–86. DOI: 10.31857/S0205961422060033.
6. Ершов Д. В., Соколова Е. Н. Количественные оценки прямых пирогенных эмиссий углерода в лесах России по данным дистанционного мониторинга 2021 года // Вопросы лесной науки. 2022. Т. 5. № 4. Ст. 117. 17 с. DOI: 10.31509/2658-607x-202254-117.
7. Лупян Е. А., Барталев С. А., Балашов И. В. и др. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 158–175. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
8. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др. Опыт эксплуатации и развития центра коллективно-пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
9. Лупян Е. А., Лозин Д. В., Балашов И. В. и др. Исследование зависимости степени повреждений лесов пожарами от интенсивности горения по данным спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 217–232. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.
10. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов и абсорбции поглотителями парниковых газов не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2021 гг. Часть 1. М., 2023. 479 с. <https://unfccc.int/documents/631719>.
11. Стыщенко Ф. В., Барталев С. А. Картографирование последствий воздействия природных пожаров на лесные экосистемы России // 15-е Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу. Томск: ИМКЭС СО РАН, 2023. С. 338–341.
12. Шинкаренко С. С., Барталев С. А. Перспективы картографирования фитомассы тростниковых сообществ в пойменных и дельтовых ландшафтах Нижней Волги // Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2023. С. 418. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a.
13. Шинкаренко С. С., Барталев С. А., Берденгалиева А. Н. Спутниковые наблюдения задымлений от тростниковых пожаров на Нижней Волге // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 93–105. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-93-105.
14. Akagi S. K., Yokelson R. J., Wiedinmyer C. et al. Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models // Atmospheric Chemistry and Physics. 2011. V. 11(9). P. 4039–4072. DOI: 10.5194/acp-11-4039-2011.
15. Anderson K., Chen J., Englefield P. et al. The global forest fire emissions prediction system version 1.0 // Geoscientific Model Development preprint. 2024. 57 p. DOI: 10.5194/gmd-2024-31.
16. Andreae M. O., Merlet P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning // Global Biogeochemical Cycles. 2001. V. 15(4). P. 955–966. DOI: 10.1029/2000GB001382.
17. Avitabile V., Herold M., Heuvelink G. B. M. et al. An integrated pan-tropical biomass map using multiple reference datasets // Global Change Biology, 2016. V. 22(4). P. 1406–1420. DOI: 10.1111/gcb.13139.
18. Boschetti L., Roy D. P., Giglio L. et al. Global validation of the collection 6 MODIS burned area product // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 235. Article 111490. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111490.
19. Byrne B., Liu J., Bowmna K., Pascolini-Campbell M., Chatterjee A., Pandey S., Miyazaki K., van der Werf G., Wunch D., Wennberg P., Roehl C., Sinha S. Unprecedented Canadian forest fire carbon emissions during 2023 // Research Square preprint. 2023. 29 p. https://assets-eu.researchsquare.com/files/rs-3684305/v1_covered_13190486-f8e5-4695-841d-fbfc7aa6cc8e.pdf?c=1701398741.

20. *Chen Y., Hall J., van Wees D. et al.* Multi-decadal trends and variability in burned area from the fifth version of the Global Fire Emissions Database (GFED5) // *Earth System Science Data*. 2023. V. 15(11). P. 5227–5259. DOI: 10.5194/essd-15-5227-2023.
21. *Christian T.J., Kleiss B., Yokelson R.J. et al.* Comprehensive laboratory measurements of biomass-burning emissions: 1. Emissions from Indonesian, African, and other fuels // *J. Geophysical Research*. 2003. V. 108. Iss. D28. Article 4719. DOI: 10.1029/2003JD003704.
22. *Darmenov A., da Silva A.* The quick fire emissions dataset (QFED): Documentation of versions 2.1, 2.2, and 2.4 // *Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation*. 2015. V. 38. <https://gmao.gsfc.nasa.gov/pubs/docs/Darmenov796.pdf>.
23. *Elvidge C.D., Zhizhin M., Sparks T. et al.* Global satellite monitoring of exothermic industrial activity via infrared emissions // *Remote Sensing Environment*. 2023. V. 15. Iss. 19. Article 4760. DOI: 10.3390/rs15194760.
24. *Fan L., Wigneron J.P., Ciais P. et al.* Siberian carbon sink reduced by forest disturbances // *Nature Geoscience*. 2023. V. 16. P. 56–62. DOI: 10.1038/s41561-022-01087-x.
25. *Franquesa M., Lizundia-Loiola J., Stehman S.V., Chuvieco E.* Using long temporal reference units to assess the spatial accuracy of global satellite-derived burned area products // *Remote Sensing of Environment*. 2022. V. 269. Article 112823. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112823.
26. *Ichoku C., Ellison L.* Global top-down smoke-aerosol emissions estimation using satellite fire radiative power measurements // *Atmospheric Chemistry Physics*. 2014. V. 14(13). P. 6643–6667. DOI: 10.5194/acp-14-6643-2014.
27. *Kaiser J.W., Heil A., Andreae M.O. et al.* Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power // *Biogeosciences*. 2012. V. 9(1). P. 527–554. DOI: 10.5194/bg-9-527-2012.
28. *Krylov A., McCarty J.L., Potapov P. et al.* Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002–2011 // *Environmental Research Letters*. 2014. V. 9. Article 105007. DOI: 10.1088/1748-9326/9/10/105007.
29. *Liu T., Micklely L.J., Marlier M.E. et al.* Diagnosing spatial biases and uncertainties in global fire emissions inventories: Indonesia as regional case study // *Remote Sensing Environment*. 2020. V. 237. Article 111557. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111557.
30. *McCarty J., Krylov A., Prishchepov A. et al.* Agricultural fires in European Russia, Belarus, and Lithuania and their impact on air quality, 2002–2012 // *Land-cover and land-use changes in Eastern Europe after the collapse of the Soviet Union in 1991* / eds. Gutman G., Radeloff V. Cham; Switzerland: Springer Intern. Publ. 2017. P. 193–221. DOI: 10.1007/978-3-319-42638-9_9.
31. *Mota B., Wooster M.J.* A new top-down approach for directly estimating biomass burning emissions and fuel consumption rates and totals from geostationary satellite fire radiative power (FRP) // *Remote Sensing Environment*. 2018. V. 206. P. 45–62. DOI: 10.1016/j.rse.2017.12.016.
32. *Ostroukhov A., Klimina E., Kuptsova V., Naito D.* Estimating long-term average carbon emissions from fires in non-forest ecosystems in the temperate belt // *Remote Sensing Environment*. 2022. V. 14(5). Article 1197. DOI: 10.3390/rs14051197.
33. *Ponomarev E., Yakimov N., Ponomareva T. et al.* Current trend of carbon emissions from wildfires in Siberia // *Atmosphere*. 2021. V. 12(5). Article 559. DOI: 10.3390/atmos12050559.
34. *Ponomarev E.I., Zabrodin A.N., Shvetsov E.G., Ponomareva T.V.* Wildfire intensity and fire emissions in Siberia // *Fire*. 2023. V. 6. Iss. 7. Article 246. DOI: 10.3390/fire6070246.
35. *Romanov A.A., Tamarovskaya A.N., Gloor E. et al.* Reassessment of carbon emissions from fires and a new estimate of net carbon uptake in Russian forests in 2001–2021 // *Science Total Environment*. 2022. V. 846. Article 157322. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157322.
36. *Seiler W., Crutzen P.J.* Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere from biomass burning // *Climatic Change*. 1980. V. 2(3). P. 207–247. DOI: 10.1007/BF00137988.
37. *Shiraishi T., Hirata R., Hirano T.* New inventories of global carbon dioxide emissions through biomass burning in 2001–2020 // *Remote Sensing Environment*. 2021. V. 13(10). Article 1914. DOI: 10.3390/rs13101914.
38. *Shvidenko A., Schepaschenko D., Sukhinin A., McCallum I., Masyutov S.* Carbon Emissions from Forest Fires in Boreal Eurasia between 1998–2010 // *Proc. 5th Intern. Wildland Fire Conf.* 2011. <https://pure.iiasa.ac.at/9789>.
39. *Urbanski S.* Wildland fire emissions, carbon, and climate // *Forest Ecology Management*. 2014. V. 317. P. 51–60. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.05.045.
40. *van der Werf G.R., Randerson J.T., Giglio L. et al.* Global fire emissions estimates during 1997–2016 // *Earth System Science Data*. 2017. V. 9(2). P. 697–720. DOI: 10.5194/essd-9-697-2017.
41. *van Leeuwen T.T., van der Werf G.R., Hoffmann A.A. et al.* Biomass burning fuel consumption rates: a field measurement database // *Biogeosciences*. 2014. V. 11(24). P. 7305–7329. DOI: 10.5194/bg-11-7305-2014.

42. van Wees D., van der Werf G. R., Randerson J. T. et al. Global biomass burning fuel consumption and emissions at 500 m spatial resolution based on the Global Fire Emissions Database (GFED) // *Geoscientific Model Development*. 2022. V. 15(22). P. 8411–8437. DOI: 10.5194/gmd-15-8411-2022.
43. Vivchar A. V., Moiseenko K. B., Pankratova N. V. Estimates of carbon monoxide emissions from wildfires in Northern Eurasia for air quality assessment and climate modeling // *Izvestiya, Atmospheric Oceanic Physics*. 2010. V. 46(3). P. 281–293. DOI: 10.1134/S0001433810030023.
44. Wiedinmyer C., Kimura Y., McDonald-Buller E. C. et al. The fire inventory from NCAR version 2.5: an updated global fire emissions model for climate and chemistry applications // *Geoscientific Model Development*. 2023. V. 16(13). P. 3873–3891. DOI: 10.5194/gmd-16-3873-2023.
45. Wooster M. J., Roberts G., Perry G. L. W., Kaufman Y. J. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release // *J. Geophysical Research*. 2005. V. 110. Article D24311. Iss. D24. DOI: 10.1029/2005JD006318.
46. Xu L., Saatchi S. S., Yang Y. et al. Changes in global terrestrial live biomass over the 21st century // *Science Advances*. 2021. V. 7(27). Article eabe9829. DOI: 10.1126/sciadv.abe9829.
47. Zhizhin M., Matveev A., Ghosh T. et al. Measuring gas flaring in Russia with multispectral VIIRS nightfire // *Remote Sensing Environment*. 2021. V. 13(16). Article 3078. DOI: 10.3390/rs13163078.

A comparative analysis of wildfire carbon emissions estimates in Russia according to global inventories

A. M. Matveev, S. A. Bartalev

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: matveevhwre@gmail.com

The paper focuses on a comparative analysis of global fire emissions inventories in application to estimate wildfire carbon emissions in Russia for the period of years 1997–2023. The following inventories developed using remote sensing data have been considered: GFAS v1.2, GFED v4.1s, FEER v1.0-GFAS v1.2, FINN v2.5, QFED v2.5-r1. Depending on the inventory, Russia's average annual contribution to global wildfire carbon emissions is estimated at 6–11 %, or 130–275 Tg C (3.5–7.5 % considering forest fires emissions only). Annual wildfire carbon emissions vary from 54 to 490 Tg C depending on the inventory and annual fire activity, with peak values observed in years of extremely large and intense forest fires (2003, 2008, 2012, and 2021). Forest fires account for 53–72 % of total wildfire carbon emissions. Global inventories' estimates exceed the officially reported data for forest fires, which only considers fires in the managed forest areas (80 Tg C emissions annually). Over the observation period of 2002–2023, according to the inventories considered, there has been an upward trend in forest fires carbon emissions (+0.5 Tg C per year) and a decrease in emissions from non-forest fires (–1.25 Tg C per year). The reviewed inventories show a high correlation value ($R^2 > 0.8$) of time-series of total annual carbon emissions estimates. However, on a per pixel basis, the correlation of carbon emission estimates between inventories is significantly lower ($R^2 = 0.22...0.44$, $p < 0.001$; spatial resolution 0.1°). The contribution of emission sources other than wildfires (e.g., gas flares) to wildfire carbon emissions is estimated to be 0.5–6.6 %, depending on the inventory considered.

Keywords: remote sensing, wildfires, fire emissions, carbon emissions

Accepted: 01.07.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-141-161

References

1. Bartalev S. A., Egorov V. A., Efremov V. Yu., Loupian E. A., Stytsenko F. V., Flitman E. V., Integrated burnt area assessment based on combine use of multi-resolution MODIS and Landsat-TM/ETM+ satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 9–26 (in Russian).

2. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., Egorov V. A., Loupian E. A., Satellite-based assessment of Russian forest fire mortality, *Lesovedenie*, 2015, Vol. 2. pp. 83–94 (in Russian).
3. Bartalev S., Egorov V., Zharko V., Loupian E., Plotnikov D., Khvostikov S., Shabanov N., *Land cover mapping over Russia using Earth observation data*, Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
4. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., Khvostikov S. A., Loupian E. A., Methodology of post-fire tree mortality monitoring and prediction using remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 176–193 (in Russian), DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193.
5. Bondur V. G., Gordo K. A., Zima A. L., Satellite research of the effects of wildfires on the territory of Russia for various types of vegetation cover, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2022, No 6, pp. 74–86 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961422060033.
6. Ershov D. V., Sochilova E. N., Quantitative estimates of direct pyrogenic carbon emissions in forests of Russia according to remote monitoring data 2021, *Voprosy lesnoi nauki*, 2022, Vol. 5, No. 4, Article 117, 17 p. (in Russian), DOI: 10.31509/2658-607x-202254-117.
7. Loupian E. A., Bartalev S. A., Balashov I. V. et al., Satellite monitoring of forest fires in the 21st century in the territory of the Russian Federation (facts and figures based on active fires detection), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 158–175 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
8. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A. et al., Experience of development and operation of the “IKI-Monitoring” center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
9. Loupian E. A., Lozin D. V., Balashov I. V. et al., Study of the dependence of forest fire damage degree on burning intensity based on satellite monitoring data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No 3, pp. 217–232 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.
10. *Natsional’nyi doklad o kadastre antropogennykh vybrosov i absorbtzii poglotitelyami parnikovyykh gazov ne reguliruemyykh Monreal’skim protokolom za 1990–2021 gg. Chast’ I* (National report on anthropogenic sources of emissions and greenhouse absorbers not regulated by the Montreal Protocol in 1990–2021. Part 1), Moscow, 2023, 479 p. (in Russian), <https://unfccc.int/documents/631719>.
11. Stytsenko F. V., Bartalev S. A., Mapping the effect of the wildfires on the forest ecosystems of Russia, *15-e Sibirskoe soveshanie i shkola molodikh uchenikh po klimato-ecologicheskomy monitorinu* (Proc. Siberian conf. and school of the young scientist on the ecological and climatological monitoring). Tomsk: IMCES SD RAS, 2023, pp. 338–341 (in Russian).
12. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Prospects of phytomass mapping of the reed communities in the delta landscapes of Lower Volga, *Materialy 21-i Mezhdunarodnoi konferentsii “Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa”* (Proc. 21th Intern. Conf. “Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space”), 2023, p. 418 (in Russian), DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a.
13. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Berdengalieva A. N., Satellite observations of reed fire smoke on the Lower Volga, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 2, pp. 93–105 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-93-105.
14. Akagi S. K., Yokelson R. J., Wiedinmyer C. et al., Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models, *Atmospheric Chemistry Physics*, 2011, Vol. 11(9), pp. 4039–4072, DOI: 10.5194/acp-11-4039-2011.
15. Anderson K., Chen J., Englefield P. et al., The global forest fire emissions prediction system version 1.0, *Geoscientific Model Development preprint*, 2024, 57 p., DOI: 10.5194/gmd-2024-31.
16. Andreae M. O., Merlet P., Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, Vol. 15(4), pp. 955–966, DOI: 10.1029/2000GB001382.
17. Avitabile V., Herold M., Heuvelink G. B. M. et al., An integrated pan-tropical biomass map using multiple reference datasets, *Global Change Biology*, 2016, Vol. 22(4), pp. 1406–1420, DOI: 10.1111/gcb.13139.
18. Boschetti L., Roy D. P., Giglio L. et al., Global validation of the collection 6 MODIS burned area product, *Remote Sensing Environment*, 2019, Vol. 235, Article 111490, DOI: 10.1016/j.rse.2019.111490.
19. Byrne B., Liu J., Bowman K., Pascolini-Campbell M., Chatterjee A., Pandey S., Miyazaki K., van der Werf G., Wunch D., Wennberg P., Roehl C., Sinha S., Unprecedented Canadian forest fire carbon emissions during 2023, *Research Square preprint*, 2023, 29 p., https://assets-eu.researchsquare.com/files/rs-3684305/v1_covered_13190486-f8e5-4695-841d-fbfc7aa6cc8e.pdf?c=1701398741.
20. Chen Y., Hall J., van Wees D. et al., Multi-decadal trends and variability in burned area from the fifth version of the Global Fire Emissions Database (GFED5), *Earth System Science Data*, 2023, Vol. 15(11), pp. 5227–5259, DOI: 10.5194/essd-15-5227-2023.
21. Christian T. J., Kleiss B., Yokelson R. J. et al., Comprehensive laboratory measurements of biomass-burning emissions: 1. Emissions from Indonesian, African, and other fuels, *J. Geophysical Research*, 2003, Vol. 108, Issue D28, Article 4719, DOI: 10.1029/2003JD003704.

22. Darmenov A., da Silva A., The quick fire emissions dataset (QFED), Documentation of versions 2.1, 2.2, and 2.4, *Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation*, 2015, Vol. 38, <https://gmao.gsfc.nasa.gov/pubs/docs/Darmenov796.pdf>.
23. Elvidge C. D., Zhizhin M., Sparks T. et al., Global satellite monitoring of exothermic industrial activity via infrared emissions, *Remote Sensing Environment*, 2023, Vol. 15, Issue 19, Article 4760, DOI: 10.3390/rs15194760.
24. Fan L., Wigneron J. P., Ciais P. et al., Siberian carbon sink reduced by forest disturbances. *Nature Geoscience*, 2023, Vol. 16, pp. 56–62, DOI: 10.1038/s41561-022-01087-x.
25. Franquesa M., Lizundia-Loiola J., Stehman S. V., Chuvieco E., Using long temporal reference units to assess the spatial accuracy of global satellite-derived burned area products, *Remote Sensing of Environment*, 2022, Vol. 269, Article 112823. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112823.
26. Ichoku C., Ellison L., Global top-down smoke-aerosol emissions estimation using satellite fire radiative power measurements, *Atmospheric Chemistry Physics*, 2014, Vol. 14(1), pp. 6643–6667, DOI: 10.5194/acp-14-6643-2014.
27. Kaiser J. W., Heil A., Andreae M. O. et al., Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power, *Biogeosciences*, 2012, Vol. 9(1), pp. 527–554, DOI: 10.5194/bg-9-527-2012.
28. Krylov A., McCarty J. L., Potapov P. et al., Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002–2011, *Environmental Research Letters*, 2014, Vol. 9, Article 105007, DOI: 10.1088/1748-9326/9/10/105007.
29. Liu T., Mickley L. J., Marlier M. E. et al., Diagnosing spatial biases and uncertainties in global fire emissions inventories: Indonesia as regional case study, *Remote Sensing Environment*, 2020, Vol. 237, Article 111557, DOI: 10.1016/j.rse.2019.111557.
30. McCarty J., Krylov A., Prishchepov A. et al., Agricultural fires in European Russia, Belarus, and Lithuania and their impact on air quality, 2002–2012, In: *Land-cover and land-use changes in Eastern Europe after the collapse of the Soviet Union in 1991*, Gutman G., Radeloff V. (eds.), Cham, Switzerland: Springer Intern. Publ., 2017, pp. 193–221, DOI: 10.1007/978-3-319-42638-9_9.
31. Mota B., Wooster M. J., A new top-down approach for directly estimating biomass burning emissions and fuel consumption rates and totals from geostationary satellite fire radiative power (FRP), *Remote Sensing Environment*, 2018, Vol. 206, pp. 45–62, DOI: 10.1016/j.rse.2017.12.016.
32. Ostroukhov A., Klimina E., Kuptsova V., Naito D., Estimating long-Term average carbon emissions from fires in non-forest ecosystems in the temperate belt, *Remote Sensing Environment*, 2022, Vol. 14(5), Article 1197, DOI: 10.3390/rs14051197.
33. Ponomarev E., Yakimov N., Ponomareva T. et al., Current trend of carbon emissions from wildfires in Siberia, *Atmosphere*, 2021, Vol. 12(5), Article 559, DOI: 10.3390/atmos12050559.
34. Ponomarev E. I., Zabrodin A. N., Shvetsov E. G., Ponomareva T. V., Wildfire intensity and fire emissions in Siberia, *Fire*, 2023, Vol. 6, Issue 7, Article 246, DOI: 10.3390/fire6070246.
35. Romanov A. A., Tamarovskaya A. N., Gloor E. et al., Reassessment of carbon emissions from fires and a new estimate of net carbon uptake in Russian forests in 2001–2021, *Science Total Environment*, 2022, Vol. 846, Article 157322, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157322.
36. Seiler W., Crutzen P. J., Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere from biomass burning, *Climatic Change*, 1980, Vol. 2(3), pp. 207–247, DOI: 10.1007/BF00137988.
37. Shiraishi T., Hirata R., Hirano T., New inventories of global carbon dioxide emissions through biomass burning in 2001–2020, *Remote Sensing Environment*, 2021, Vol. 13(10), Article 1914, DOI: 10.3390/rs13101914.
38. Shvidenko A., Schepaschenko D., Sukhinin A., McCallum I., Masyutov S., Carbon emissions from forest fires in boreal Eurasia between 1998–2010, *5th Intern. Wildland Fire Conf.*, 2011, <https://pure.iiasa.ac.at/9789>.
39. Urbanski S., Wildland fire emissions, carbon, and climate, *Forest Ecology Management*, 2014, Vol. 317, pp. 51–60, DOI: 10.1016/j.foreco.2013.05.045.
40. van der Werf G. R., Randerson J. T., Giglio L. et al., Global fire emissions estimates during 1997–2016, *Earth System Science Data*, 2017, Vol. 9(2), pp. 697–720, DOI: 10.5194/essd-9-697-2017.
41. van Leeuwen T. T., van der Werf G. R., Hoffmann A. A. et al., Biomass burning fuel consumption rates: a field measurement database, *Biogeosciences*, 2014, Vol. 11(24), pp. 7305–7329, DOI: 10.5194/bg-11-7305-2014.
42. van Wees D., van der Werf G. R., Randerson J. T. et al., Global biomass burning fuel consumption and emissions at 500 m spatial resolution based on the Global Fire Emissions Database (GFED), *Geoscientific Model Development*, 2022, Vol. 15(22), pp. 8411–8437, DOI: 10.5194/gmd-15-8411-2022.
43. Vivchar A. V., Moiseenko K. B., Pankratova N. V., Estimates of carbon monoxide emissions from wildfires in Northern Eurasia for air quality assessment and climate modeling, *Izvestiya, Atmospheric Oceanic Physics*, 2010, Vol 46(3), pp. 281–293, DOI: 10.1134/S0001433810030023.

44. Wiedinmyer C., Kimura Y., McDonald-Buller E. C. et al., The fire inventory from NCAR version 2.5: an updated global fire emissions model for climate and chemistry applications, *Geoscientific Model Development*, 2023, Vol. 16(13), pp. 3873–3891, DOI: 10.5194/gmd-16-3873-2023.
45. Wooster M. J., Roberts G., Perry G. L. W., Kaufman Y. J., Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations, FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release, *J. Geophysical Research*, 2005, Vol. 110, Issue D24, Article D24311, DOI: 10.1029/2005JD006318.
46. Xu L., Saatchi S. S., Yang Y. et al., Changes in global terrestrial live biomass over the 21st century, *Sciences Advances*, 2021, Vol. 7(27), Article eabe9829, DOI: 10.1126/sciadv.abe9829.
47. Zhizhin M., Matveev A., Ghosh T. et al., Measuring gas flaring in Russia with multispectral VIIRS night-fire, *Remote Sensing Environment*, 2021, Vol. 13(16), Article 3078, DOI: 10.3390/rs13163078.