

DOI: 10.31509/2658-607x-202474-155
УДК 630.43

УТОЧНЕННЫЕ ОЦЕНКИ ПРЯМЫХ ПИРОГЕННЫХ ЭМИССИЙ УГЛЕРОДА В ЛЕСАХ РОССИИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА С 2011 ПО 2023 ГОДЫ

© 2024

Д. В. Ершов, Е. Н. Сочилова, К. А. Ковганко

*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
Россия, 117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14*

*E-mail: dvershov67@gmail.com

Поступила в редакцию: 11.11.2024

После рецензирования: 26.11.2024

Принята к печати: 28.11.2024

В статье приводятся уточненные оценки размеров прямых эмиссий углерода от лесных пожаров в России по спутниковым данным за период с 2011 по 2023 гг. Основные отличия от оценок предыдущих публикаций – это использование новой версии ежегодно обновляемых продуктов допожарных запасов лесных горючих материалов, в состав которых включены новые данные о запасах верхнего древесного полога, подроста и подлеска, живого напочвенного покрова и крупных древесных остатков. А также применение новых продуктов породно-возрастной структуры лесов, степени повреждения огнем лесной растительности для картографирования типа пожара и его интенсивности и коэффициентов расходов лесных горючих материалов для крупных древесных остатков. В результате указанных выше изменений в данных и алгоритме расчета за тринадцатилетний период средняя ежегодная пирогенная эмиссия составляет 107.4 ± 56.7 МтС \times год⁻¹ или 393.7 ± 207.9 СО₂-эквивалента. Полученные оценки прямых эмиссий углерода от пожаров сопоставимы с международными данными. В аномальные 2012 и 2021 годы эмиссии от лесных пожаров составили 250.8 и 175.1 МтС или 919.6 и 642.2 МтСО₂-эквивалента, соответственно. Два последних года отмечаются низкой горимостью лесов и интенсивностью пожаров, за счет которых в границах исследуемого интервала лет наблюдается тренд на снижение пирогенных выбросов на 12 Мт СО₂-эквивалента в год относительно среднепогодного значения.

Ключевые слова: лесные пожары, пирогенные эмиссии, углерод, дистанционный мониторинг, лесные горючие материалы

В последнее десятилетие представлено миру несколько глобальных тематических продуктов с оценками прямых эмиссий углекислого газа (CO₂) от природных пожаров на основе анализа и обработки спутниковых данных (Kaiser et al., 2012; Ichoku, Ellison, 2014; Darmenov, da Silva, 2015; van der Werf et al., 2017; Liu, Shi, 2023; Wiedinmyer et al., 2023). Большинство продуктов используют метод «снизу-вверх» для определения объема сгоревшей биомассы на основе анализа допожарных данных о запасах живой биомассы в листьях и стволах, мертвой биомассы (валеж, сухостой) и лесной подстилке, и площадях пожаров и их интенсивности (через индекс радиационной мощности отраженного излучения – Fire Radiative Power) по данным спектрорадиометра MODIS (van der Werf et al., 2017). Авторы продукта FINN v2.5 (Wiedinmyer et al., 2023) дополнительно используют кроме данных MODIS, детектированные пожары прибором VIIRS, для глобальной оценки масштабов прямых пожарных эмиссий углекислого газа. Китайские ученые (Liu, Shi, 2023) использовали данные детектирования очагов активного горения китайского спутника FY-3 для проведения глобальных оценок

эмиссий CO₂ от пожаров за период с 2016 по 2022 гг. Для территории России данные по многолетним эмиссиям опубликованы в работах В. Г. Бондура (Бондур и др., 2016) и Е. И. Пономарева на территорию Сибири и Дальнего Востока (Ponomarev et al., 2023).

По данным экспертов (Liu, Yang, 2023), каждый из представленных выше продуктов имеет свою точность и уровень неопределенности в оценках пожарных эмиссий для разных биомов и регионов планеты. Это определяется набором входных данных допожарных объемов запасов углерода в растительности, а также методами определения интенсивности горения (FRP) и, соответственно, доли сгоревшей фитомассы в зависимости от типа пожара и его интенсивности.

Похожие выводы сделали авторы статьи (Kukavskaya et al., 2013) при анализе доступных спутниковых продуктов площадей пожаров на территорию Сибири. По их оценкам уровень различий в площадях пожаров может достигать 40%, что может привести к ошибкам определения расходов объемов биомассы лесных горючих материалов (ЛГМ) в широком диапазоне от 3 до 98% в зависимости от конкретного используемого

продукта растительного покрова и погодных условий. Основным выводом, который сделали авторы статьи – пространственная и семантическая точность данных о типах и запасах ЛГМ и моделей восстановления типа горения и интенсивности пожара имеют решающее значение для получения достоверных оценок размеров выбросов CO₂ от лесных пожаров в Сибири.

В 2022 году в журнале «Вопросы лесной науки» были опубликованы наши результаты по эмиссиям углерода и его соединений от пожаров за период с 2002 по 2021 гг. для территории России (Ершов, Сочилова, 2022). Однако эти оценки базировались еще на менее точных методах построения карт запасов лесных горючих материалов (Сочилова и др., 2009) и оценки прямых эмиссий углерода от пожаров (Ершов и др., 2009) из-за ограниченного набора тематических продуктов характеристик растительного покрова наземных экосистем и наземных данных о запасах фитомассы лесов России (Ершов и др., 2023).

В рамках работ первого этапа Важнейшего инновационного проекта (2022–2024 гг.) по разработке национальной системы климатического мониторинга (РИТМ углерода ..., 2024) был

создан ряд новых спутниковых тематических продуктов с характеристиками лесов и других наземных экосистем среднего пространственного разрешения (230 м), которые позволили значительно перестроить технологию пространственного моделирования запасов ЛГМ и расширить состав слоев основных проводников горения вертикального профиля древостоя (Ершов и др., 2023). Также были модифицированы алгоритмы определения зон возможного распространения верхового пожара с помощью тематических продуктов, отражающих пространственное распределение основных лесообразующих пород, сомкнутости и возраста древостоев.

Таким образом, по результатам указанных выше модификаций методов и технологий в статье приводятся уточненные оценки прямых эмиссий углекислого газа и других парниковых газов от лесных пожаров в России за период с 2011 по 2023 годы, что является целью настоящего сообщения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оценка прямых эмиссий углерода от лесных пожаров выполняется методами геопространственного анализа спутниковых продуктов очагов пожаров

текущего года (площадь пожара и категория состояния поврежденных лесов) и допожарных запасов ЛГМ и характеристик лесов, полученных по спутниковым данным предыдущего года.

Схема последовательности обработки данных для оценки прямых эмиссий углерода, углекислого и других парниковых газов от лесных пожаров приводится на рисунке 1.

Этап 1. Выделение зон возможного распространения верхового огня

Распространение верхового типа горения считается возможным, если выполняются следующие условия:

- пиксель (участок) относится к покрытой лесом территории;
- участок принадлежит одной из хвойных пород;
- сомкнутость древесного полога участка (проективного покрытия крон деревьев) составляет не менее 0.3 для молодняков и не менее 0.4 для взрослых древостоев.

Карта возможного распространения верхового пожара создается на основе совмещения и геопространственного анализа спутниковых продуктов преобладающих древесных пород, сомкну-

тости лесного покрова и классов возраста лесов.

Этап 2. Восстановление характера и интенсивности пожара

Восстановление характера и интенсивности пожара осуществляется методом наложения двух растровых карт: средневзвешенная категория состояния (СКС) поврежденных лесов и зоны возможного распространения верхового типа горения, в результате которого выделяются типы лесных пожаров: верховые и низовые с различной степенью интенсивности.

При верховых устойчивых пожарах огнем охватываются все компоненты лесного биогеоценоза: хвоя и мелкие ветви в кронах деревьев, подрост и подлесок, напочвенный покров, крупные древесные остатки (КДО) и лесная подстилка.

Устойчивые низовые пожары по интенсивности горения делятся на три категории: сильные, средние и слабые. При сильных низовых пожарах сгорают напочвенный покров, подлесок, кроны отдельных деревьев, а также значительная часть лесной подстилки и КДО. При низовых пожарах средней интенсив-

ности огнем охватываются: напочвенный покров, часть КДО и подрост, а также верхний слаборазложившийся слой лесной подстилки. При слабых низовых пожарах в горении участвуют, как правило, только напочвенный покров с неразложившимся опадом.

К верховому типу горения относятся участки с очень сильной степенью повреждения лесной растительности (погибшие), относящиеся к зонам возможного распространения верхового огня.

К низовому типу горения с высокой интенсивностью относятся участки с очень сильным повреждением лесной растительности (погибшие) вне зон возможного распространения верхового огня, а также все участки с сильным повреждением лесной растительности (усыхающие древостои).

К низовому типу горения со средней и слабой интенсивностью относятся соответственно участки со средней

(сильно ослабленные) и слабой степенью повреждения (слабо поврежденные / ослабленные насаждения) лесной растительности.

Участки лесной растительности с отсутствием повреждений считаются не пройденными огнем и не учитываются при оценке размеров пожарных эмиссий.

Этап 3. Оценка расходов ЛГМ и размеров пожарных эмиссий углерода

Данные о запасах фитомассы ЛГМ по слоям вертикального профиля древостоя: верхнего древесного полога, подроста и подлеска, живого напочвенного покрова, крупных древесных остатков (сухостоя, сухих ветвей в кронах живых деревьев, валежа, пней), живого напочвенного покрова и лесной подстилки, определяются с использованием спутниковых продуктов предыдущего года. Это означает, что для определения пожарных эмиссий 2023 года используются карты запасов ЛГМ 2022 года (Ершов и др., 2023).

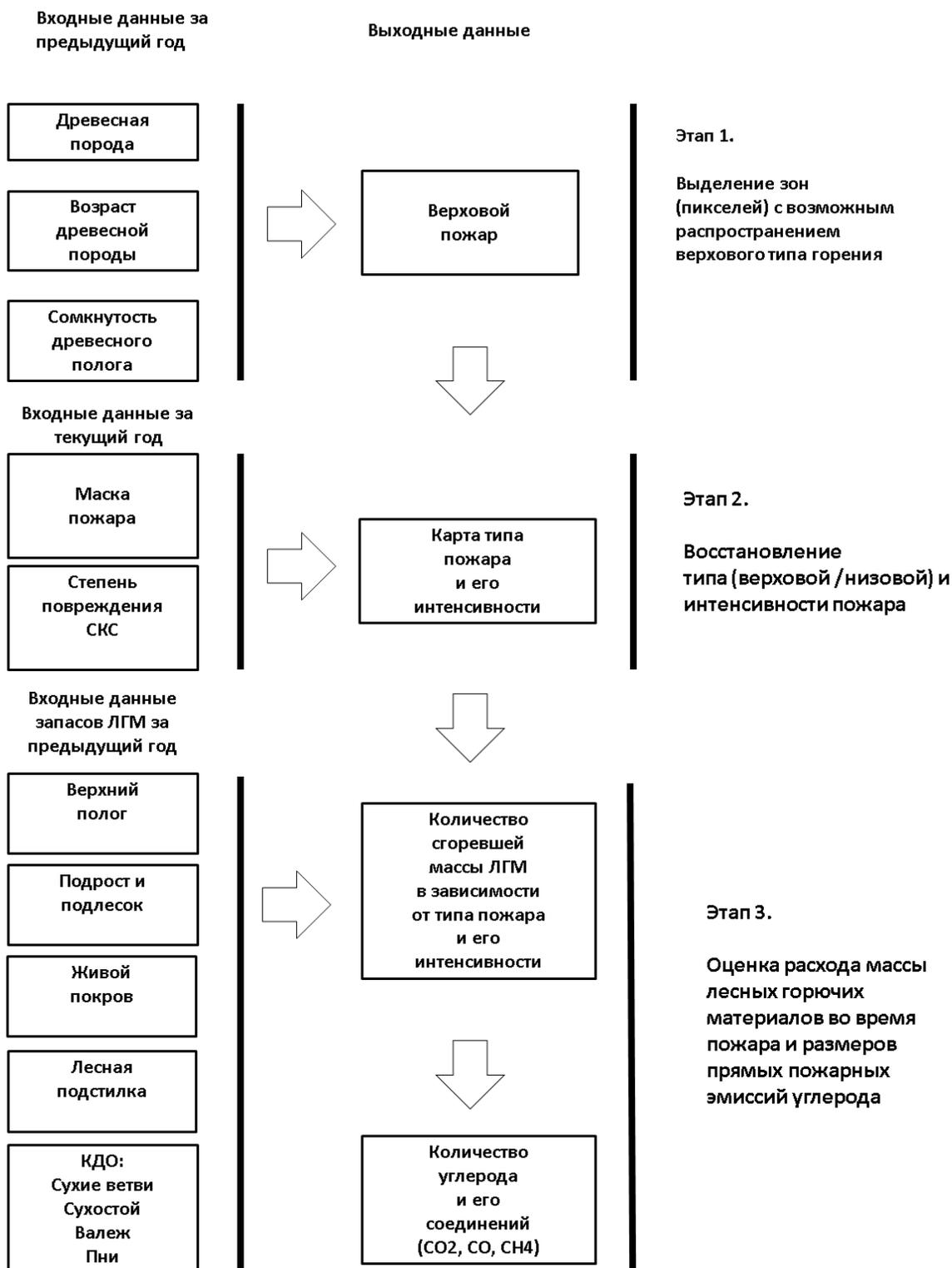


Рисунок 1. Схема обработки данных для оценки прямых пожарных эмиссий углерода

Масса сгорающих органических материалов на каждом пройденном огнем участке находится через запасы ЛГМ до пожара и долю расходуемых

горючих материалов, зависящих от типа и интенсивности пожара. Для участков, пройденных пожаром, масса сгорающих ЛГМ определяется из соотношения:

$$Q = \sum W_{(i)} \times \beta_{(i)} \quad (1)$$

где:

$W_{(i)}$ - масса i -й компоненты ЛГМ до пожара, т×га⁻¹;

$\beta_{(i)}$ - доля i -й компоненты ЛГМ, сгорающая при пожаре;

Q - масса органических материалов, сгорающих при пожаре, т×га⁻¹

Численные значения коэффициентов $\beta_{(i)}$ подобраны на основе анализа литературных данных экспериментальных исследований различных авторов по расходам проводников горения ЛГМ и берутся из справочной таблицы (табл. 1) (Исаев и др., 1995; Janetos, Isaev, 1998;

Isaev et al., 2002).

В результате выполнения трёх этапов общий объем пожарных эмиссий углерода рассчитывается произведением массы сгоревших органических материалов Q и доли углерода в их составе (доля углерода равна 0.5).

Таблица 1. Доля сгорающих ЛГМ при лесных пожарах

Тип пожара	Интенсивность	Доля ЛГМ, сгорающая при лесных пожарах							
		Полог древостоя	Подрост и подлесок	Напочвенны й покров	Лесная подстилка	КДО			
						Сухостой	Сухие ветви	Валеж	Пни
Верховой	Очень высокая	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	1.0	0.8	0.8
Низовой	Высокая	0.1	1.0	1.0	0.7	0.5	0.1	0.5	0.5
	Средняя	0	0.4	0.8	0.4	0.3	0	0.3	0.3
	Низкая	0	0	0.4	0	0	0	0	0

Методика оценки эмиссии углерода от лесных пожаров была апробирована на данных 2011–2023 года, для которых использовался следующий набор входных спутниковых продуктов среднего пространственного разрешения, 230 м (Барталев и др., 2016) для расчета

1) допожарных запасов ЛГМ за период с 2010–2022 гг.:

- карта преобладающих пород;
- карта бонитетов;
- карта возраста;
- карта полноты древостоя;
- карта запасов сыrorастущей древесины

2) прямых эмиссий углерода от лесных пожаров:

- карта преобладающих пород (2010–2022 гг.);
- карта сомкнутости лесов (2010–2022 гг.);
- карта возраста (2010–2022 гг.);
- карта средневзвешенной категории состояния (2011–2023 гг.)

В результате обработки был сформирован набор растровых тематических продуктов за 2011–2023 гг., в каждом пикселе которых записываются следу-

ющие параметры:

- код класса «лес», где возможно распространение верхового типа пожара;
- код класса «тип пожара и его интенсивности» (верховой пожар, низовой низкой, средней и высокой интенсивности);
- значение углерода сгоревшей фитомассы по слоям вертикального профиля древостоя.

Карты запасов углерода использовались для статистического анализа и расчета суммарных значений прямых пожарных эмиссий углерода и его соединений на всей территории России за период с 2011 по 2023 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Уточненные оценки прямых пожарных эмиссий углерода за период с 2011 по 2023 годы приводятся в таблице 2. В результате обработки спутниковых данных средняя пройденная пожарам площадь составила 6.2 (\pm 2.8) млн. га, а размеры прямых пирогенных выбросов углерода – 107.4 (\pm 5 6.7) МтС/год или 393.7 (\pm 207.9) МтСО₂-эквивалента.

Таблица 2. Оценки прямых эмиссии углерода и других парниковых газов от лесных пожаров, полученных за 2011-2023 гг. спутниковых наблюдений на территории России

Год	Прямые эмиссии углерода от пожаров, МтС	Удельные эмиссии, т/га	Пройденная лесными пожарами площадь, млн. га	Эмиссии парниковых газов, млн. т		
				CO ₂	CO	CH ₄
2011	79.7	17.59	4.5	292.2	11.2	1.3
2012	250.8	18.82	13.3	919.6	35.1	4.0
2013	68.3	18.24	3.7	250.6	9.6	1.1
2014	98.8	19.56	5.1	362.3	13.8	1.6
2015	71.1	16.51	4.3	260.5	9.9	1.1
2016	110.3	16.47	6.7	404.5	15.4	1.8
2017	74.4	19.60	3.8	272.9	10.4	1.2
2018	121.4	16.61	7.3	445.2	17.0	1.9
2019	133.0	19.68	6.8	487.8	18.6	2.1
2020	121.4	16.04	7.6	445.2	17.0	1.9
2021	175.1	18.51	9.5	642.2	24.5	2.8
2022	45.0	12.82	3.5	165.0	6.3	0.7
2023	46.6	11.19	4.2	170.8	6.5	0.7
Среднее значение ± ст. отклонение за весь период	107.4±56.7	17.1±2.59	6.2±2.8	393.7±207.9	15.0±7.9	1.7±0.9

В аномальные 2012 и 2021 годы эмиссии от лесных пожаров составили 250.8 и 175.1 МтС или 919.6 и 642.2 МтCO₂-эквивалента, соответственно. Уточненные оценки в 3.0 (307.3 МтCO₂) и 2.6 (243.6 МтCO₂) раза больше по срав-

нению с предыдущей версией оценок, опубликованной в статье (Ершов, Соколова, 2022).

В рамках Важнейшего инновационного проекта ученые ИКИ РАН (Матвеев, Барталев, 2024) провели анализ и срав-

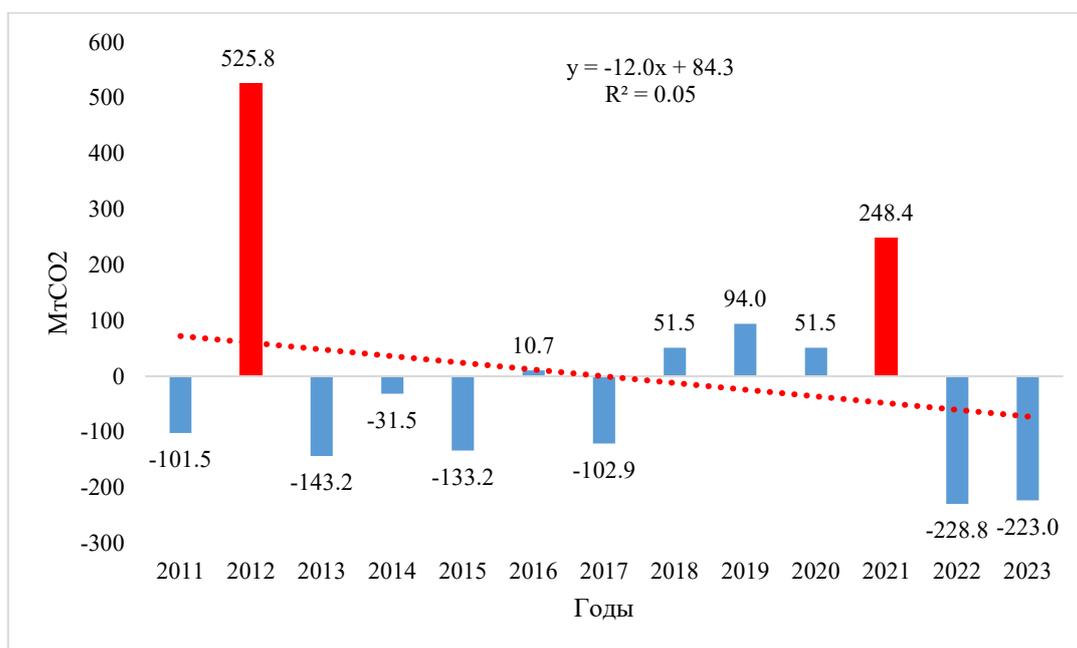


Рисунок 2. Отклонение прямых эмиссий CO₂ от лесных пожаров относительно среднемноголетнего значения, рассчитанного за период с 2011 по 2023 гг.

нение данных прямых пожарных эмиссий, полученных несколькими авторами (Kaiser et al., 2012; Ichoku, Ellison, 2014; van der Werf et al., 2017; Ponomarev et al., 2023 и др.) для территории России за период 2002–2023 гг. Для сопоставления с нашими данными, из этого анализа были выбраны и предварительно пересчитаны значения (среднее и стандартное отклонение) за период 2011–2023 гг. Итак, за период с 2011 по 2023 гг. средние значения для продукта GFAS v1.2 (Kaiser et al., 2012) составили 502.59 ± 217.68 МтCO₂, для продукта FEER (Ichoku, Ellison, 2014) – 416.12 ± 132.55

МтCO₂, для продукта GFED v4.1s (van der Werf et al., 2017) – 451.95 ± 254.42 МтCO₂, по оценкам авторов (Ponomarev et al., 2023) за период 2011–2022 г. – 636.02 ± 345.15 МтCO₂ и по оценкам ИКИ РАН – 328.43 ± 190.96 МтCO₂. Соответственно, можно сделать вывод, что наши среднемноголетние оценки (393.7 ± 207.9 МтCO₂) сопоставимы с международными и российскими данными пожарных эмиссий CO₂ и других парниковых газов от лесных пожаров для территории России.

За счет последних пожароопасных сезонов 2022 и 2023 гг. среднее значение

выбросов CO₂ снизилось и составило 393.7 МтCO₂, в результате чего наметился тренд на снижение ежегодных выбросов на 12 Мт (рис. 2). Однако этот показатель очень динамичный и меняется ежегодно в зависимости от горимости следующего пожароопасного сезона. По мере накопления количества наблюдаемых лет средний показатель пожарных выбросов станет более устойчивым к новым данным и менее зависимым от аномальных лет, что позволит также оценивать его динамику и прогноз выбросов от лесных пожаров в последующие годы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований, доработок методов и технологии геопространственного анализа данных о лесных пожарах можно сделать следующие выводы.

Использование новой версии ежегодно обновляемых продуктов допжарных запасов ЛГМ, в состав которых включены новые данные о запасах верхнего древесного полога, подроста и подлеска, живого напочвенного покрова и крупных древесных остатков, а также применение новых продуктов породно-возрастной структуры лесов, степени

повреждения огнем лесной растительности (для картографирования типа пожара и его интенсивности) и коэффициентов расходов крупных древесных остатков, позволили получить величину объемов прямых эмиссий углерода от лесных пожаров для территории России, сопоставимые с мировыми и российскими оценками.

Как и в предыдущих наших публикациях, за период с 2011 по 2023 гг. сохраняется 9-ти летний интервал между аномальными пожароопасными годами при анализе данных о пожарах для всей территории России.

В границах исследуемого интервала наблюдается отрицательный тренд пирогенных выбросов на 12 Мт CO₂-эквивалента в год относительно средне-многолетнего значения за счет двух последних пожароопасных сезонов, отмеченных низкой горимостью.

Планируется расширить интервал лет в сторону начала 21 века по мере обработки исторических данных о пожарах и спутниковых продуктов характеристик лесов среднего пространственного разрешения.

Массовые наземные данные о характеристиках лесов и их состоянии в результате лесных пожаров, полученные

в рамках работ по созданию национальной сети тестовых полигонов мониторинга климатически активных веществ (РИТМ углерода ..., 2024) создают научную основу для разработки методов валидации и оценки неопределенности спутниковых продуктов запасов лесных горючих материалов и ежегодных выбросов от лесных пожаров на территории России.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Статистическая оценка размеров пирогенных эмиссий углерода выпол-

нена в рамках государственного задания ЦЭПЛ РАН №124013000750-1, создание и геопространственный анализ спутниковых продуктов и карт выполнены при поддержке Важнейшего инновационного проекта – Соглашение №169-15-2023-004 от 1 марта 2023 г. о предоставлении субсидии, заключенным между Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Центром по проблемам экологии и продуктивности лесов Российской академии наук и Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.

Бондур В. Г., Гордо К. А., Кладов В. Л. Пространственно-временные распределения площадей пожаров и эмиссий углеродосодержащих эмиссий и аэрозолей на территории Северной Евразии по данным космического мониторинга // Исследования Земли из космоса. 2016. № 6. С. 3–20.

Ершов Д. В., Ковганко К. А., Сочилова Е. Н. ГИС-технология оценки пирогенных эмиссий углерода по данным Terra-Modis и государственного учета лесов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6. № 2. С. 365–372.

Ершов Д. В., Сочилова Е. Н. Количественные оценки прямых пирогенных эмиссий углерода в лесах России по данным дистанционного мониторинга 2021 года // Вопросы лесной науки. 2022. Т. 5. № 4. Статья № 117. DOI: 10.31509/2658-607x-202254-117

Ершов Д. В., Сочилова Е. Н., Королева Н. В.

Методические подходы к картографированию лесных горючих материалов // Вопросы лесной науки. 2023. Т. 6. № 2. Статья № 128. DOI: 10.31509/2658-607x-202362-128

Исаев А. С., Коровин Г. Н., Сухих В. И.,

*Титов С. П., Уткин А. И., Голуб А. А.,
Замолодчиков Д. Г., Пряжников А. А.* Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России. Аналитический обзор. Центр экологической политики России. 1995. 155 с.

Матвеев А. М., Барталев С. А. Сравнительный анализ оценок эмиссии углерода от природных пожаров на территории России на основании глобальных продуктов ДЗЗ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 4. С. 141–161. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-141-161

РИТМ углерода. 2024. URL: <https://ritm-s.ru/> (дата обращения 05.11.2024).

Сочилова Е. Н., Ершов Д. В., Коровин Г. Н. Методы создания карт запасов лесных горючих материалов низкого пространственного разрешения //

Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6. № 2. С. 441–449.

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. URL: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/pubs/docs/Darmenov796.pdf> (дата обращения 05.11.2024).

Ichoku C., Ellison L. Global top-down smoke-aerosol emissions estimation using satellite fire radiative power measurements // Atmospheric Chemistry Physics. 2014. Vol. 14(13). P. 6643–6667. DOI: 10.5194/acp-14-6643-2014

*Isaev A. S., Korovin G. N., Bartalev S. A.,
Ershov D. V., Janetos A., Kasishke E. S.,
Sugart H. H., French N. H., Orlick B. E.,
Murphy T. L.* Using remote sensing for assessment of forest wildfire carbon emissions // Climate Change. 2002. Vol. 55. P. 235–249.

Janetos A., Isaev A. S. (eds.). Research of Parameters and Sustainability of Boreal Forests, 1st and 2nd Reports, U.S.-Russian Joint Commission on Economic and Technological Cooperation.

- Environmental Working Group. 1998. Report Number 291500-1-T. 92-20085, 13 p.
- Kaiser J. W., Heil A., Andreae M. O., Benedetti A., Chubarova N., Jones L., Morcrette J.-J., Razinger M., Schultz M. G., Suttie M., van der Werf G. R. Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power // *Biogeosciences*. 2012. Vol. 9. P. 527–554. DOI: 10.5194/bg-9-527-2012
- Kukavskaya E. A., Soja A. J., Petkov A. P., Ponomarev E. I., Ivanova G. A., Conard S. G. Fire emissions estimates in Siberia: evaluation of uncertainties in area burned, land cover, and fuel consumption // *Canadian Journal of Forest Research*. 2013. Vol. 43. No. 5. DOI: 10.1139/cjfr-2012-0367
- Liu M., Yang L. A global fire emission dataset using the three-corner hat method (FiTCH) // *Earth System Science Data Discussions*. [preprint]. 2023. DOI: 10.5194/essd-2023-150
- Liu Y., Shi Y. Estimates of Global Forest Fire Carbon Emissions Using FY-3 Active Fires Product // *Atmosphere*. 2023. Vol. 14. No 10. P. 1575. DOI: 10.3390/atmos14101575
- Ponomarev E. I., Zabrodin A. N., Shvetsov E. G., Ponomareva T. V. Wildfire Intensity and Fire Emissions in Siberia // *Fire*. 2023. No. 6 (7). Article 246. DOI: 10.3390/fire6070246
- van der Werf G. R., Randerson J. T., Giglio L., van Leeuwen T. T., Chen Y., Rogers B. M., Mu M., van Marle M. J. E., Morton D. C., Collatz G. J., Yokelson R. J., Kasibhatla P. S. Global fire emissions estimates during 1997–2016 // *Earth System Science Data*. 2017. Vol. 9. P. 697–720. DOI: 10.5194/essd-9-697-2017
- Wiedinmyer C., Kimura Y., McDonald-Buller E. C., Emmons L. K., Buchholz R. R., Tang W., Seto K., Joseph M. B., Barsanti K. C., Carlton A. G., Yokelson R. 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. P. 3873–3891. DOI: 10.5194/gmd-16-3873-2023

REFERENCES

- Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Lupjan E. A., Plotnikov D. E., Hvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over

- Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p.
- Bondur V. G., Gordo K. A., Kladov V. L., Prostranstvenno-vremennye raspredeleniya ploshchadej pozharov i emissij uglerodosoderzhashchih gazov i aerorozolej na territorii Severnoj Evrazii po dannym kosmicheskogo monitoringa (Spatial and Temporal Distributions of Wildfire Areas and Carbon-Bearing Gas and Aerosol Emissions in North Eurasia Based on Satellite Monitoring Data), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, No 6, pp. 3–20.
- 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> (November 05, 2024).
- Ershov D. V., Kovganko K. A., Sochilova E. N., GIS-tehnologija ocenki pirogennyh jemissij ugleroda po dannym Terra-MODIS i gosudarstvennogo ucheta lesov (GIS-technology of fire carbon emission assessment using Terra-Modis products and state forest account data), *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Issue 6, Vol. 2, pp. 365–372.
- Ershov D. V., Sochilova E. N., Kolichestvennyye ocenki pryamyh pirogennyh emissij ugleroda v lesah Rossii po dannym distancionnogo monitoringa 2021 goda (Quantitative estimates of direct pyrogenic carbon emissions in forests of Russia according to remote monitoring data 2021), *Voprosy lesnoj nauki*, 2022, Vol. 5, No 4, Article 117, DOI: 10.31509/2658-607x-202254-117
- Ershov D. V., Sochilova E. N., Koroleva N. V. Metodicheskie podhody k kartografirovaniyu lesnyh goryuchih materialov (Methodological approaches to mapping forest fuels), *Voprosy lesnoj nauki*, 2023, Vol. 6, No 2, Article 128, DOI: 10.31509/2658-607x-202362-128
- Ichoku C., Ellison L., Global top-down smoke-aerosol emissions estimation using satellite fire radiative power measurements, *Atmospheric Chemistry Physics*, 2014, Vol. 14(13), pp. 6643–6667, DOI: 10.5194/acp-14-6643-2014
- Isaev A. S., Korovin G. N., Bartalev S. A., Ershov D. V., Janetos A., Kasishke E. S.,

- Sugart H. H., French N. H., Orlick B. E., Murphy T. L., Using remote sensing for assessment of forest wildfire carbon emissions, *Climate Change*, 2002, Vol. 55, pp. 235–249.
- Isaev A. S., Korovin G. N., Sukhikh V. I., Titov S. P., Utkin A. I., Golub A. A., Zamolodchikov D. G., Pryazhnikov A. A., *Ekologicheskie problemy pogloshcheniya uglekislogo gaza posredstvom lesovosstanovleniya i lesorazvedeniya v Rossii* (Environmental issues of carbon dioxide absorption by means of reforestation and afforestation in Russia), *Analiticheskij obzor, Centr ekologicheskoy politiki Rossii*, 1995, 156 p.
- Janetos A., Isaev A. S. (eds.), *Research of Parameters and Sustainability of Boreal Forests*, 1st and 2nd Reports, U.S.-Russian Joint Commission on Economic and Technological Cooperation. Environmental Working Group, 1998, Report Number 291500-1-T. 92-20085, 13 p.
- Kaiser J. W., Heil A., Andreae M. O., Benedetti A., Chubarova N., Jones L., Morcrette J.-J., Razinger M., Schultz M. G., Suttie M., van der Werf G. R., Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power, *Biogeosciences*, 2012, Vol. 9, pp. 527–554, DOI: 10.5194/bg-9-527-2012
- Kukavskaya E. A., Soja A. J., Petkov A. P., Ponomarev E. I., Ivanova G. A., Conard S. G., Fire emissions estimates in Siberia: evaluation of uncertainties in area burned, land cover, and fuel consumption, *Canadian Journal of Forest Research*, 2013, Vol. 43, No 5, DOI: 10.1139/cjfr-2012-0367
- Liu M., Yang L., A global fire emission dataset using the three-corner hat method (FiTCH), *Earth System Science Data, Discussions*, [preprint], 2023, DOI: 10.5194/essd-2023-150
- Liu Y., Shi Y., Estimates of Global Forest Fire Carbon Emissions Using FY-3 Active Fires Product, *Atmosphere*, 2023, Vol. 14, No 10, Article 1575, DOI: 10.3390/atmos14101575
- Matveev A. M., Bartalev S. A., Sravnitel'nyj analiz ocenok emissii ugleroda ot prirodnyh pozharov na territorii Rossii na osnovanii global'nyh produktov DZZ (A comparative analysis of wildfire carbon emissions estimates in Russia according to global inventories), *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz*

kosmosa, 2024, Vol. 21, No 4, pp. 141–161, DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-141-161

Ponomarev E. I., Zabrodin A. N., Shvetsov E. G., Ponomareva T. V., Wildfire Intensity and Fire Emissions in Siberia, *Fire*, 2023, No 6 (7), Article 246, DOI: 10.3390/fire6070246

RITM-Carbon, available at: <https://ritm-c.ru/> (November 5, 2024)

Sochilova E. N., Ershov D. V., Korovin G. N., Metody sozdaniya kart zapasov lesnyh gorjuchih materialov nizkogo prost-ranstvennogo razresheniya (Methods of course resolution forest fuel load mapping), *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Vol. 2, Issue 6, pp. 441–449.

van der Werf G. R., Randerson J. T., Giglio L., van Leeuwen T. T., Chen Y., Rogers B. M., Mu M., van Marle M. J. E., Morton D. C., Collatz G. J., Yokelson R. J., Kasibhatla P. S., Global fire emissions estimates during 1997–2016, *Earth System Science Data*, 2017, Vol. 9, pp. 697–720, DOI: 10.5194/essd-9-697-2017

Wiedinmyer C., Kimura Y., McDonald-Buller E. C., Emmons L. K., Buchholz R., Tang W., Seto K., Joseph M. B., Bar-santi K. C., Carlton A. G., Yokelson R. 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, pp. 3873–3891, DOI: 10.5194/gmd-16-3873-2023

REFINED ESTIMATES OF DIRECT PYROGENIC CARBON EMISSIONS IN RUSSIAN FORESTS BASED ON REMOTE MONITORING DATA FROM 2011 TO 2023

D. V. Ershov *, E. N. Sochilova, K. A. Kovganko

*Centre for Forest Ecology and Productivity of the RAS
Profsoyuznaya st. 84/32 bldg. 14, Moscow, 117997, Russia*

* E-mail: dvershov67@gmail.com

Received: 11.11.2024

Revised: 26.11.2024

Accepted: 28.11.2024

The paper presents refined estimates of direct carbon emissions from forest fires in Russia based on satellite data for the period from 2011 to 2023. The main differences from the estimates in previous our publications are the use of a new version of annually updated products of pre-fire forest combustible fuels (FCF), which include new data on the reserves of FCF in the upper tree canopy, undergrowth, living ground vegetation cover and wood debris. In addition, we use new products of forest species and age structure, the level of fire damage to forest vegetation for mapping the type and fire severity, and the coefficients of fuel consumption in wood debris. As a result of the above changes in the data and the calculation algorithm for the thirteen-year period, the average annual pyrogenic emission is 107.4 ± 56.7 MtC year⁻¹ or 393.7 ± 207.9 CO₂ equivalent. The obtained estimates of direct Carbon emissions from fires are comparable with international data. In anomaly years of 2012 and 2021, emissions from forest fires amounted to 250.8 and 175.1 MtC or 919.6 and 642.2 MtCO₂, respectively. The last two years have been detected by low forest burning and fire intensity, due to which, within the boundaries of the studied interval of years, a trend towards a decrease in pyrogenic emissions by 12 MtCO₂-equivalent per year relative to the long-term average is observed.

Keywords: *wildfires, pyrogenic emissions, carbon, remote sensing monitoring, forest fire fuels*

Рецензент: К.Т.Н. Пономарев Е. И.