Дистанционные данные об энергетических характеристиках пожаров Сибири в оценках сгорающей фитомассы

Е. И. Пономарёв [1,3], А. Н. Забродин [1], К. Ю. Литвинцев [2]

[1] *Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск, 660036, Россия*
E-mail: evg@ksc.krasn.ru
[2] *Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН*
Новосибирск, 630090, Россия
[3] *Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, Россия*

Выполнена проверка гипотезы о согласии оценок сгорающего запаса лесных горючих материалов на основе подхода, ориентированного на интерпретацию регистрируемой энергии теплоизлучения пожара, и альтернативных вычислений методом учёта площадей пожаров и допожарных запасов фитомассы. Анализировались энергетические характеристики пожаров в нескольких лесных районах Сибири по данным стандартного продукта MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Выборка составляла 25 пожаров общей площадью 1,6 млн га, зафиксированных в 2018, 2020–2022 и 2024 гг. В работе использовались данные о мощности теплоизлучения активных зон пожара, вычисляемые по методике FRP (*англ.* fire radiative power). Выполнялось интегрирование данных рядов по времени с целью вычисления энергии теплоизлучения пожаров FRE (*англ.* fire radiative energy). Для анализируемой выборки пожаров расхождение вычисляемых значений сгоревшей фитомассы M_{FRE} и массы сгоревшего лесного горючего материала M_S составляло от 5 до 46 %, при среднем — 26 %. Вариативность невязки при анализе для отдельных районов зафиксирована в диапазоне 10–31 %. Применение предлагаемого подхода для базы данных лесных пожаров Сибири за период 2001–2025 гг. и пересчёт в объёмы прямых пожарных эмиссий показали относительно низкое расхождение между анализируемыми рядами с коэффициентом корреляции Пирсона на уровне $r = 0{,}85$ ($p < 0{,}1$). Получены оценки среднемноголетних значений фитомассы, выгорающей при пожарах Сибири, в пределах 100–500 млн т, диапазон значений эмиссий от лесных пожаров C_{FRE} зафиксирован в пределах (24–189) Тг/год, среднее — (79±19) Тг/год, что согласуется с известной вариативностью значений фитомассы/эмиссий. Результаты на основе интерпретации регистрируемой энергии теплоизлучения пожара и альтернативные расчёты аппроксимируются линейно с достоверностью $R^2 = 0{,}72$ ($p < 0{,}1$), что показывает применимость подхода, основанного на анализе FRE, для решения данного класса задач.

Ключевые слова: лесные пожары, мощность теплоизлучения, энергия излучения пожара, FRP, FRE, пожарное воздействие, фитомасса, Сибирь

Одобрена к печати: 05.06.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-155-167

Введение

Пожары ежегодно оказывают масштабное воздействие на растительные покровы России и Сибири. В этой связи актуально развивать и совершенствовать методы и системы количественных оценок сгорающих объёмов фитомассы лесных горючих материалов (ЛГМ) в целях контроля углеродного баланса на уровне экосистем, регионов или в планетарном масштабе. Для региона Сибирь при значительном многообразии лесорастительных условий и характеристик пожаров в них (Забродин, Пономарёв, 2024; Пономарёв, 2024) количественные оценки нарушенности растительных покровов и вычисления пожарных эмиссий, как правило, имеют высокую степень неопределённости (Ершов и др., 2024). При этом калибровки наземными средствами или по данным натурных экспериментов представлены в единичных публикациях (Иванов и др., 2024; Самсонов и др., 2010; Smirnov et al., 2015), поэтому важно иметь возможность выполнения расчётов альтернативными методами, основываясь на прямых инструментальных измерениях дистанционными средствами.

Адаптировать и повысить эффективность оценок сгорающей фитомассы и объёмов эмиссий можно на основе решения обратной задачи, когда данные регистрируемого теплоизлучения от активной зоны горения по материалам спутникового мониторинга в режиме реального времени пересчитываются непосредственно в количество сгорающих лесных горючих материалов. В этом смысле мгновенные значения радиационной мощности FRP (*англ.* fire radiative power) от участка активного горения пропорциональны интенсивности и скорости сгорания фитомассы (Kumar et al., 2011; Wooster et al., 2021; Xu et al., 2026), а интегрирование по времени данной характеристики позволяет восстановить энергию пожара, выделяющуюся в форме теплового излучения FRE (*англ.* fire radiative energy). Количественные данные об энергетических параметрах горения позволяют перейти к прямым оценкам сгорающей фитомассы (Алексеева и др., 2020; Kaiser et al., 2012; Kumar et al., 2011; Ponomarev et al., 2021; Wooster et al., 2005). Вариативность параметра FRP/FRE, характеризующего тепловыделение зон активного горения, восстанавливается из данных спутниковой съёмки в диапазоне $\lambda = 3{,}9$ мкм. Данные о FRP доступны по материалам стандартных продуктов ряда спутников Terra, Aqua, SNPP (*англ.* Suomi National Polar-orbiting Partnership), NOAA-20 (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration), NOAA-21 за период с 2001 г. по настоящее время.

Оценки пожарного воздействия, как правило, косвенно характеризуют послепожарное состояние древостоев на всю территорию лесов России без детализации количественных показателей (Лупян и др., 2022; Пономарев, Швецов, 2024). В развитие направления анализа энергетических характеристик пожаров был предложен подход интерпретации мощности теплоизлучения в терминах объёма сгорающей фитомассы как меры пожарного воздействия на растительные покровы. Подход был разработан и апробирован в Институте леса им. В. Н. Сукачёва СО РАН (ИЛ СО РАН) — Федеральном исследовательском центре «Красноярский научный центр СО РАН» (ФИЦ КНЦ СО РАН) (Пономарёв, Забродин, 2026; Пономарёв, Пономарёва, 2025).

Ранее была показана применимость энергетических характеристик пожаров в задачах детектирования очагов верхового горения (Пономарев и др., 2017) и в оценке степени повреждения древостоев (Барталев и др., 2015; Лупян и др., 2022; Heward et al., 2013; Ponomarev et al., 2022). Вычисление объёмов сгорающих лесных горючих материалов, исходя из данных FRP/FRE с учётом доли переноса тепла излучением α, существенно расширяет область применения результатов оперативного спутникового мониторинга. Доля излучения может составлять от 14 до 45 % энергии, выделяемой в процессе горения (Валендик и др., 2006). В современной практике оценки сгорающего количества ЛГМ на территории Сибири данные, как правило, получают, ориентируясь на такие параметры, как площадь пожара, табулированные сведения о запасах ЛГМ (Алексеев, Бердси, 1994) и эмпирически подбираемые коэффициенты недожога (Иванов и др., 2024). Переход на использование инструментально ориентированного подхода позволяет снизить степень неопределённости подобных оценок, минимизируя эмпирику вычислительного процесса. Безусловно, точность дистанционного метода определяет уровень валидации и калибровки результатов.

Предлагаемая работа нацелена на оценку согласованности вычислений сгорающей фитомассы через мощность теплоизлучения FRP и радиационную энергию пожара FRE посредством анализа теплового излучения и прямых вычислений выгорания ЛГМ в различных типах растительности Сибири через площади пожаров.

Для достижения цели мы решали следующие задачи: 1) анализ характеристик допожарного запаса ЛГМ для выборки пожаров в привязке к доминирующим вариантам растительности Сибири; 2) интерполяция и пересчёт данных мгновенной мощности теплоизлучения в энергию теплоизлучения пожара; 3) расчёт количества сгорающего ЛГМ на основе двух подходов и оценка уровня невязки для полученных данных для выборки пожаров, а также в приложении к многолетним данным пожарных эмиссий.

Исходные данные и методы обработки

Работа выполнена с использованием выборки относительно крупных (площадью $S > 2000$ га) пожаров за период 2018–2024 гг., распределённых на территории Сибири и Дальнего Востока в лесорастительных районах, где преобладают различные типы и сочетания растительного покрова. Район интересов включает *Дальневосточный лесостепной район*, занимающий около 36 % территории России, с доминированием лиственницы, сосны, широколиственных насаждений; *Восточно-Сибирский район притундровых лесов*, где в условиях континентального климата произрастают в основном редкостойные лиственничные древостои и кедровый стланик; *Восточно-Сибирский таёжный мерзлотный район* арктического и субарктического континентального климата с доминированием лиственничников, а также сосны и сосны сибирской (кедра); *Приангарский район* с разнообразием лесообразующих пород — лиственница, сосна, берёза, осина, в горной части — сосна сибирская (кедр) (*рис. 1*).

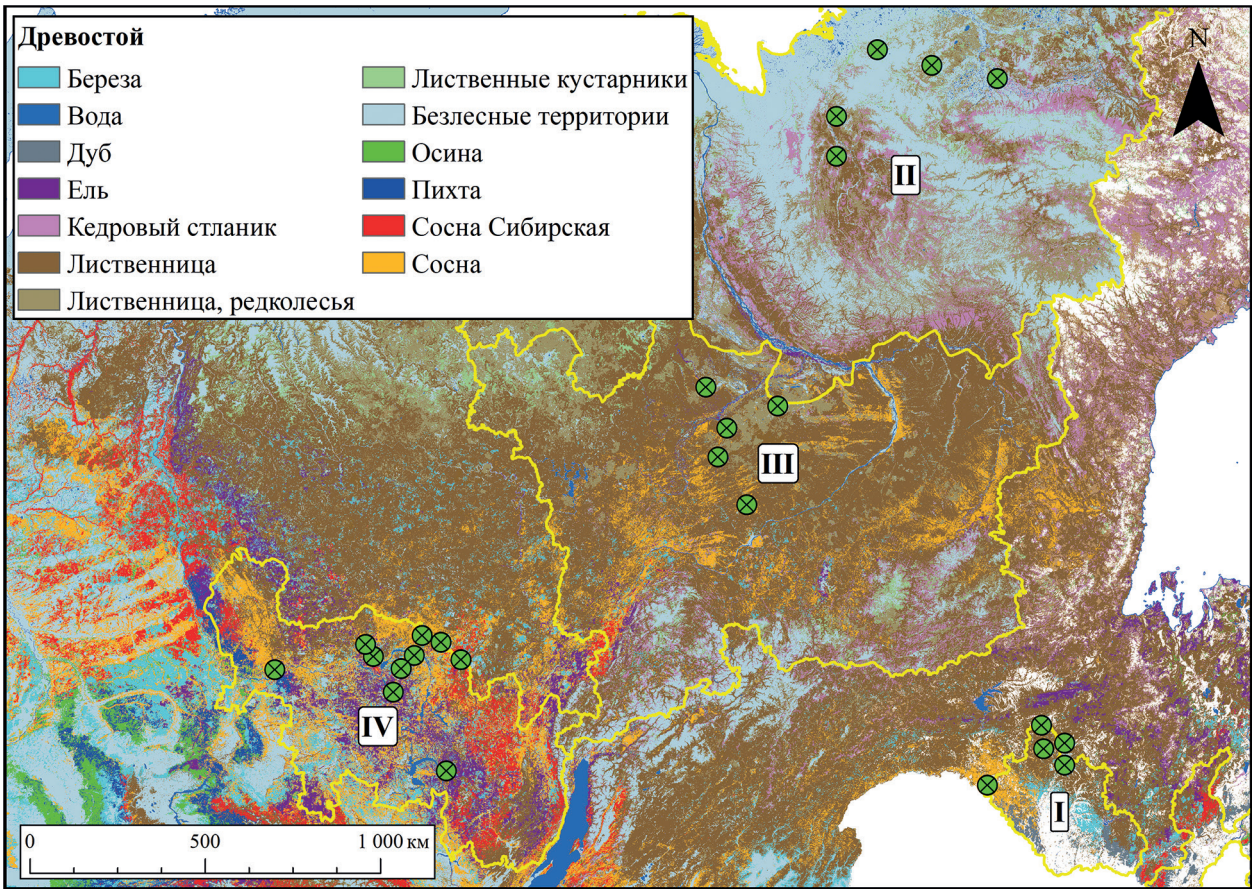


Рис. 1. Район интересов на карте растительности по материалам сервиса «Вега-PRO» (http://pro-vega.ru/maps). Жёлтым цветом обозначены границы лесных районов исследуемой выборки пожаров: I — северо-восточная часть Дальневосточного лесостепного района, II — северо-восточная часть Восточного-Сибирского района притундровых лесов, III — центральная часть Восточно-Сибирского таёжного мерзлотного района, IV — западная, северная части Приангарского района. Символы зелёного цвета обозначают положение пожаров

Выборка пожаров составляла 25 событий общей площадью более 1,6 млн га (*табл. 1*). Контроль древостоев и привязка полигонов пожаров к вариантам растительного покрова выполнялась с использованием карты «Вега-PRO» (http://pro-vega.ru/maps/) средствами геоинформационного анализа.

Для каждого пожарного события рассматривалась вариация мощности теплоизлучения FRP. Исходные данные со значениями FRP для исследуемой территории в формате вектор-

ных точечных покрытий (shape-файлы) были выбраны из открытого каталога базы данных FIRMS (*англ.* Fire Information for Resource Management System) (https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov).

Таблица 1. Характеристика выборки пожаров

Описание территории	Номер района	Количество пожаров	Годы пожаров	*S*, тыс. га	Преобладающие древостои
Северо-восточная часть Дальневосточного лесостепного района	I	5	2024	335	Лиственница, сосна, дуб, берёза, травянистые сообщества
Северо-восточная часть Восточно-Сибирского района притундровых лесов	II	5	2024	794	Лиственничные редколесья, кедровый стланик, тундры
Центральная часть Восточно-Сибирского таёжного мерзлотного района	III	5	2024	346	Лиственничные редколесья, сосна
Западная, северная части Приангарского района	IV	10	2018, 2020–2022	120	Сосна, сосна сибирская (кедр), ель, берёза, лиственница

В целях унификации исходных данных в работе использованы ретроспективные материалы спутниковых систем Aqua, Terra MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) без дополнения выборки материалами SNPP, NOAA-20, NOAA-21. В стандартном продукте Коллекции 6 значения FRP определяются из соотношения (Giglio et al., 2016):

$$\mathrm{FRP} = \frac{A_{pix}\sigma}{a}\left(L_4 - \bar{L}_4\right),$$

где A_{pix} — площадь пикселя MODIS (является функцией угла сканирования); σ — постоянная Стефана – Больцмана, $\sigma = 5{,}6704 \cdot 10^{-8}$ Вт·м$^{-2}$·К$^{-4}$; L_4 — энергетическая яркость термически активного пикселя (цели) в канале 21 радиометра MODIS (длина волны $\lambda \approx 3{,}9$ мкм); $\bar{L}_4$ — энергетическая яркость фона в том же спектральном диапазоне; a — эмпирическая постоянная, $a = 3 \cdot 10^{-9}$ Вт·м$^{-2}$·ср$^{-1}$·мкм$^{-1}$·К$^{-4}$.

Ряды значений FRP, регистрируемые в режиме реального времени, как правило, имеют существенные пробелы в течение срока развития пожара. Это может быть связано с отсутствием съёмки (в дневное или ночное время), метеорологической обстановкой (задымление от пожаров, облачность), наличием некорректных значений (при экстремумах температуры цели, больших углах сканирования и пр.). В работе применялась процедура интерполяции значений FRP для дат, пропущенных по причине дискретности или неинформативности спутниковых данных, на основе усреднения по смежным доступным значениям с использованием варьируемого по времени (2–4 дня) окна усреднения. Ближайшие доступные значения, взятые за срок 2–4 дня до и после пропущенного интервала, могли значительно различаться между собой по амплитуде. Выбранный метод интерполяции таким образом учитывал сценарий развития каждого пожара выборки, сглаживая скачкообразные изменения значений FRP между данными до и после пропущенного интервала. Процедура выполнялась стандартными средствами программы MS Excel. Использование такого подхода в предварительной подготовке данных позволило получить распределение мощности теплоизлучения без пробелов в данных.

Для оценки энергии пожара в формате теплового излучения FRE (Kumar et al., 2011) необходимо выполнять интегрирование по времени рядов мощности теплоизлучения:

$$\mathrm{FRE}_i = \int_{t_1}^{t_2} \mathrm{FRP}_i \, \mathrm{d}t,$$

где FRE — энергия пожара (в МДж); FRP — радиационная мощность теплоизлучения (в МВт); i — номер пожара выборки; t_1, t_2 — время начала и окончания пожара (в с).

В силу дискретности рядов данных о мощности теплоизлучения FRP процедура заменима суммированием дискретных значений FRP за всё время развития пожара:

$$\mathrm{FRE}_i = \sum_j \mathrm{FRP}_{ij} \Delta t_j,$$

где j — номер временного шага; FRP_{ij} — мощность теплоизлучения в j-й отсчёт; Δt_j — длительность временного шага.

На следующем шаге через энергию пожара FRE вычислялась сгоревшая фитомасса M_{FRE} с учётом характерных значений удельной теплоты сгорания (Пономарёв, Забродин, 2026) и доли переноса тепла излучением α (Валендик и др., 2006). Процедура выполнялась отдельно для каждой выборки пожаров в рассмотренных лесных районах с различными вариантами растительного покрова.

$$M_{\mathrm{FRE}} = \frac{1}{\alpha q_{\text{уд}}} \mathrm{FRE}, \quad (1)$$

где FRE — энергия пожара (в Дж); $q_{\text{уд}}$ — удельная теплота сгорания единицы массы горючих материалов (в МДж/кг); α — доля теплоизлучения от энергии, выделяющейся при сгорании ЛГМ, для всех расчётов принималась равной 0,36 (Валендик и др., 2006).

В подходе, предложенном в данной работе, в отличие от других дистанционных методов оценки объёма сгоревшей фитомассы (Kaiser et al., 2012; Wooster et al., 2005), предполагающих прямую его связь с радиационной энергией пожара, отдельно выделяются удельная теплота сгорания и доля теплоизлучения α, что потенциально позволяет делать более точные расчёты при наличии дополнительных данных.

С другой стороны, масса сгоревшего ЛГМ может быть определена из мультипликативного выражения (Иванов и др., 2024; Smirnov et al., 2015; Ponomarev et al., 2021), включающего эмпирические значения коэффициента недожога, площадь пожара и оценочное значение допожарного запаса ЛГМ $Z_{\text{ЛГМ}}$, исходя из типа растительности:

$$M_S = (1-k) S Z_{\text{ЛГМ}}, \quad (2)$$

где k — коэффициент недожога; S — площадь, пройденная огнём (в га); $Z_{\text{ЛГМ}}$ — запас лесных горючих материалов на единицу площади (в кг/га).

Указанные методы расчёта (1) и (2) были применены к выборке пожаров, для каждого из которых оценивалась относительная невязка значений (Δ, %) как нормированная на M_S разность между двумя вычисленными величинами M_{FRE} и M_S. Уровень невязки, рассчитанный для каждого пожара выборки, далее усреднялся для четырёх исследованных районов с определением доверительного интервала для уровня значимости $p < 0{,}1$.

Вычисления выполнялись с использованием обобщённых сведений об основных параметрах, включённых в уравнения (1) и (2), доступных из широкого спектра опубликованных работ по теме лесной пирологии для условий Сибири (*табл. 2*).

Вариативность эмпирических коэффициентов недожога k, табличных величин $q_{\text{уд}}$ и запасов горючих материалов $\mathrm{Z}_{\text{ЛГМ}}$ учитывалась в каждом случае пожарной выборки через анализ соотношения (в %) вариантов растительного покрова в границах пожарного полигона. Тем самым в расчётах каждый из параметров рассматривался не константой, а динамически изменяющимся.

Заключительная часть работы, связанная с оценкой многолетних вариаций сгоревшей фитомассы и объёмов пожарных эмиссий, обобщает данные обо всех зарегистрированных пожарах базы данных спутникового мониторинга в Сибири за 2001–2025 гг. (Пономарёв, 2024). В обрабатываемую выборку включены пожары, которые были отнесены к категории лесных, попадали во временной интервал май – сентябрь, а также имели повторяемость при регистрации спутниковыми методами более одного раза (что отсекает короткоживущие возгорания сельхозпалов и степные пожары). Достоверных сведений применительно ко всему многообразию растительных покровов и характеристик пожаров для такой генеральной

выборки получить не представляется возможным. Поэтому в данном случае мы использовали обобщённый для зоны Сибири коэффициент конверсии, предложенный в работе (Kaiser et al., 2012). Универсальный коэффициент конверсии, определённый для большей части лесов Сибири в значении 0,13 кг/МДж (Kaiser et al., 2012), в первом приближении позволил оценить сгоревшую фитомассу через интегральные значения энергии пожаров в формате теплового излучения FRE. Далее полученные значения сгоревшей фитомассы переводились в объёмы прямых пожарных эмиссий с использованием коэффициента эмиссии 0,45 (Smirnov et al., 2015), который описывает связь сгоревшей фитомассы и массы углеродсодержащих продуктов сгорания.

Таблица 2. Табличные данные для запасов лесных горючих материалов $Z_{ЛГМ}$ (в кг/га), удельной теплоты сгорания $q_{уд}$ (в МДж/кг) и коэффициента недожога k

Варианты растительного покрова	$Z_{ЛГМ}$, $\times 10^3$ кг/га	$q_{уд}$, МДж/кг	k	Источник
Кедровый стланик Кустарники Хвойные молодняки Сосняки мохово-лишайниковые (подстилка, опад)	14,7 0,5 20,5 13,7	20,8 – – 20,8–30,2	0,6 – – –	(Зайцев, Губский, 2017); (Касымов, 2020); (Сныткин, 2001)
Лиственные (березняк разнотравный, опад, валеж)	4,4–20,0	10,2–15,4	0,31–0,50	(Лоскутов и др., 2013); (Головацкая и др., 2020); (Иванов и др., 2024)
Сосняки разнотравные (опад, валеж) Сосновый опад, подстилка сосны	12,0–15,0 15,2	13,3–15,5 21,7–22,7	0,35–0,90 0,45	(Алексеева и др., 2020); (Валендик и др., 2006); (Иванов и др., 2024); (Лоскутов и др., 2013); (Зайцев, Губский, 2017); (Касымов, 2020)
Темнохвойные (ельники) (опад хвои сосны сибирской, подстилка)	12,5–20,5 18,0–20,0	13,1–15,5 24,5	0,18–0,59 –	(Валендик и др., 2006); (Алексеева и др., 2020); (Иванов, 2024); (Касымов, 2020)
Хвойно-мелколиственные леса	9,2	–	–	(Алексеева и др., 2020)
Тундровая растительность	15,0	14,0	–	(Алексеев, Бердси, 1994)
Лиственничники (опад хвои, подстилка лиственничная)	11,6–16,0	15,5–20,0	0,7	(Валендик и др., 2006); (Лоскутов и др., 2013); (Касымов, 2020); https://inner.su/services/teplotvornaya-sposobnost-gaz-ugol-drova-pellety-tablitsy-kkal-i-mdzh/
Светлохвойные древостои (интенсивный пожар) (низовой беглый пожар)	– –	– –	0,7–0,9 0,15	(Тимофеева, Гармышев, 2017); (Белькова и др., 2017)

Полученный таким образом дополнительный ряд значений пожарных эмиссий за 2001–2025 гг. сравнивался с результатами ранее выполненных вычислений для Сибири (Ponomarev et al., 2021), ориентированных на площади пожаров. Контролировался показатель корреляции Пирсона для уровня значимости $p < 0,1$ (достоверность не ниже 90 %).

Результаты и обсуждение

Доля (в %) восстановленных записей о мощности теплоизлучения FRP по выборке пожаров в среднем варьировала на уровне 12–35 %. Интерполированные значения по амплитуде, как правило, не превышали порог среднего доверительного интервала ±1CI (*англ.* confidence interval) (*рис. 2б*, *в*). При этом можно предполагать, что в дальнейшем дополнение исходных данных материалами съёмки спутников SNPP, NOAA-20, NOAA-21 (см. *рис. 2а*) позволит

значительно снизить количество пробелов и, соответственно, долю (в %) интерполируемых данных.

Усреднённые значения FRP/FRE для рассмотренной выборки пожаров представлены в *табл. 3*, где выполнено обобщение показателей в границах лесных районов.

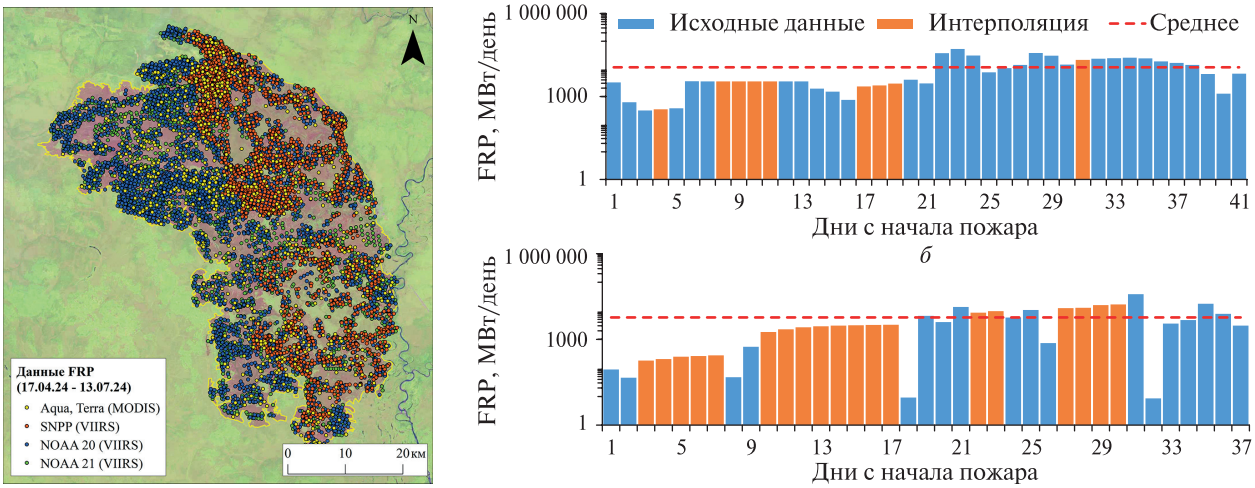


Рис. 2. Пример распределения мощности теплоизлучения в пределах послепожарного участка (*а*). Данные за 17 апреля – 13 июля 2024 г. по материалам стандартных продуктов спутников Terra, Aqua, SNPP, NOAA-20, NOAA-21. Динамика суточных значений FRP (в МВт/сут) (*б*, *в*) для пожаров выборки с различной долей (в %) пропусков

Таблица 3. Усреднённые по выборке значения FRP/FRE для четырёх рассматриваемых лесных районов

Район*	Выборка пожаров	Количество точек FRP	FRP (min–max), 10^3 МВт	Среднее FRP±CI, 10^3 МВт	FRE (min–max), 10^9 МДж	Среднее FRE±CI, 10^9 МДж
I	5	3 284	11,7–120,5	53±32	2,5–10,4	5±3
II	5	10 554	169,5–465,1	286±98	14,6–16,4	25±8
III	5	5 500	71,8–217,1	114±69	0,4–18,7	10±6
IV	10	2 899	18,7–240,1	31±12	1,8–10,8	3±1

* I–IV см. описание на *рис. 1*, *табл. 1.*

Мощность теплоизлучения пожаров в рассматриваемых районах I–IV варьировала в значительных пределах (11–465)·10^3 МВт (*табл. 3*), что зависит как от интенсивности горения, так и от длительности и общей площади каждого из рассматриваемых пожарных событий. В данном случае в силу ограниченности выборки нельзя говорить о различиях энергетических характеристик пожаров, обусловленных непосредственно разницей физико-географических или лесорастительных условий. Однако отличия (*табл. 3*) средних значений FRP в районах I, III, IV, различающихся в 2, 5 и 8 раз в сравнении с данными пожаров в Восточно-Сибирском районе притундровых лесов (II), позволяют отметить закономерность повышения FRP с продвижением в восточном и северо-восточном направлении, где минимален показатель сомкнутости древостоев, а пожары развиваются в условиях характерной для зоны тундры и лесотундры низкорослой растительности (кустарники, кедровый стланик, мохово-лишайниковый покров, торф).

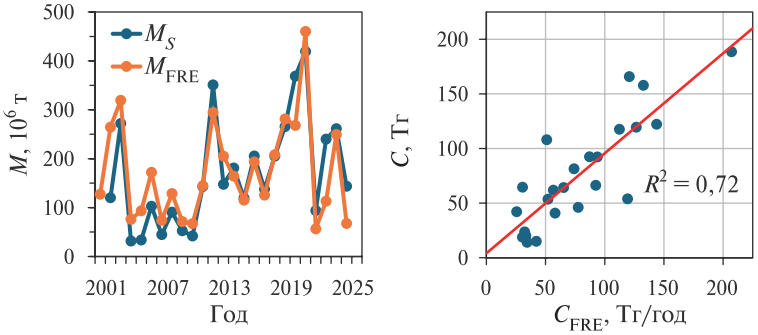
Соответствующим образом связаны и полученные оценки энергии пожара FRE = (3...25)·10^9 МДж, выделившейся в форме теплового излучения. Эта характеристика может представлять самостоятельный интерес как величина, косвенно связанная с интенсив-

ностью пожара, а далее — количественно характеризующая затраченную в результате пожара массу ЛГМ. Рассчитанные значения M_{FRE} и M_S по двум описанным алгоритмам (1) и (2) приведены в *табл. 4*.

Для анализируемой выборки пожаров расхождения значений M_{FRE} и M_S составляли от 5 до 46 %, при среднем — 26 %, вариативность невязки по рассматриваемым лесным районам зафиксирована в диапазоне 10–31 % (*табл. 4*). При значительном уровне неопределённости параметров, включаемых в алгоритм вычислений (1) и (2), можно констатировать удовлетворительный уровень сходимости результатов, полученных для ограниченной выборки (*рис. 3*). По всей вероятности, большая детализация входных характеристик будет способствовать повышению общего уровня точности. Однако здесь в не меньшей степени важна точность, а главное, репрезентативность натурных данных, наличие которых в настоящее время ограничено. В то же время этапы, связанные с обработкой спутниковых данных, не имеют таких ограничений. По нашему мнению, предложенный подход оценки сгорающей фитомассы с обозначенным уровнем неопределённости (10–31 %) характеризует степень пожарного воздействия на растительные покровы. Его практическое применение может быть востребовано в системе контроля пожарных эмиссий.

Таблица 4. Расчётные значения M_{FRE} и M_S для выборки пожаров и относительная невязка значений (Δ, %)

Район	Преобладающий древостой	M_{FRE}±CI, ×10^6 кг	M_S±CI, ×10^6 кг	Δ±CI, %
I	Лиственничники, травянистые сообщества, светлохвойные, лиственные	0,25±0,11	0,22±0,08	10±11
II	Лиственничные редколесья, тундровая растительность, кедровый стланик	1,22±0,40	0,92±0,31	24±12
III	Лиственница, редколесья, сосновые насаждения	0,57±0,35	0,36±0,18	31±18
IV	Сосняки, темнохвойные (ель, сосна сибирская), лиственные, лиственница	0,14±0,04	0,11±0,03	26±10



а *б*

Рис. 3. Сопоставление рядов данных оценок сгоревшей фитомассы (*а*) и объёмов пожарных эмиссий (*б*) на интервале 2001–2025 гг.

Основной погрешностью при использовании значений FRE при расчёте M_{FRE} является неопределённость значения доли теплоизлучения от энергии горения α (уравнение (1)), которая в общем случае определяется условиями протекания пожара: интенсивностью пожара, когда с ростом мощности пожара и, следовательно, его температуры растёт доля радиационных потерь; наличием экранирующего полога древостоя; масштабом пожара и типом ландшафта, которые могут вносить погрешность в регистрируемые значения FRP. Дальнейшее развитие метода предполагает введение зависимости α от интенсивности пожара, например, с помощью оценки среднеобъёмной температуры пожара, а также от сомкнутости полога дре-

востоя через оценку листового индекса, принимая допущения, что сам коэффициент α слабо зависит от свойств ЛГМ.

В заключительной части работы с использованием обозначенных подходов получены ряды данных о пожарных эмиссиях на территории Сибири с указанными ранее ограничениями на выборку пожаров (выборка по времени; выборка пожаров категории лесные; исключение пожаров, зафиксированных один раз) и применении универсального коэффициента, определённого для большей части лесов Сибири в значении 0,13 кг/МДж (Kaiser et al., 2012) при переводе суммарной энергии пожаров за сезон в сгоревшую фитомассу.

Следует отметить, что полученные среднемноголетние значения сгорающей фитомассы находятся в пределах 100–500 млн т, что соответствует описываемым в литературе данным (Самсонов и др., 2010). Этот факт свидетельствует о достоверности результата работы предлагаемого алгоритма интерпретации энергии пожаров FRE. Результаты, полученные на основе двух алгоритмов, имеют высокую корреляцию, коэффициент Пирсона $r = 0{,}85$. Рассчитанные значения пожарных эмиссий ($C_{\mathrm{FRE}} = 24...189$ Тг/год, среднее — 79±19 Тг/год) также зафиксированы в пределах известной вариативности (Ершов и др., 2024; Ponomarev et al., 2021). При этом можно утверждать, что предобработка исходной базы данных и применение алгоритма на основе FRE (Пономарёв, Забродин, 2026) позволяет существенно снизить завышение объёмов эмиссий, характерное для оценок спутниковыми методами, основанных на учёте площадей пожаров. Уровень корреляции результатов, полученных при использовании подходов (1) и (2), аппроксимируется линейно с достоверностью $R^2 = 0{,}72$ ($p < 0{,}1$). Следовательно, подход, основанный на анализе дистанционно измеряемой радиационной энергии пожаров, в целом применим для решения данного класса задач. Этот подход имеет потенциал развития в плане уточнения коэффициента α, определяющего долю теплоизлучения от энергии, выделяющейся при сгорании фитомассы, в зависимости от энергетики пожара.

Заключение

Представленные результаты привносят новые фундаментальные знания о значимом природно-экологическом факторе — природных пожарах — с точки зрения ключевой физической характеристики — энергии пожара, которая напрямую связана с объёмами сгорающей фитомассы и определяет степень пожарного воздействия на растительные покровы и объёмы эмиссий. Изучаемый в этой связи спектр проблем можно отнести к приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных исследований, так как новые знания об энергетике природных пожаров выступают необходимым компонентом всех современных международных и отечественных программ экологической и климатической направленности.

Представленный подход имеет практическую направленность, позволяет алгоритмизировать сервис дистанционного мониторинга степени пожарной нарушенности лесов на региональном и федеральном уровне, а также применим в экологическом контроле и прогнозировании послепожарных эффектов, таких как уровень пожарного воздействия, вероятностные оценки послепожарных отпадов древостоя, эмиссии углеродосодержащих соединений, устойчивость и динамика экосистем различных природных зон, включая криолитозону.

Работа выполнена в рамках базового проекта FWES-2024-0025 (ФИЦ КНЦ СО РАН), FWES-2024-0023 (ИЛ СО РАН). Спутниковые данные обработаны в Центре коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

Литература

1. *Алексеев В. А.*, *Бердси Р. А.* Углерод в экосистемах лесов и болот России. Красноярск: ТОО «ЭКОС», 1994. 226 с.
2. *Алексеева М. Н.*, *Пустовалов К. Н.*, *Головацкая Е. А.*, *Ященко И. Г.* Расчет аэрозольных выбросов от пожаров Томской области на основе дистанционных данных // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 9. С. 742–747. DOI: 10.15372/AOO20200912.

3. *Барталев С. А.*, *Стыценко Ф. В.*, *Егоров В. А.*, *Лупян Е. А.* Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
4. *Белькова Т. А.*, *Перминов В. А.*, *Алексеев Н. А.* К вопросу о совершенствовании методики оценки экологического ущерба от лесных пожаров // Материалы 7-й Межрегиональной научно-практич. конф. с международ. участием «Безопасность жизнедеятельности: наука, образование, практика». Южно-Сахалинск: Сахалинский гос. ун-т, 2017. С. 137–140.
5. *Валендик Э. Н.*, *Сухинин А. И.*, *Косов И. В.* Влияние низовых пожаров на устойчивость хвойных пород. Красноярск: Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2006. 98 с.
6. *Головацкая Е. А.*, *Алексеева М. Н.*, *Ященко И. Г.*, *Пустовалов К. Н.* Оценка потерь лесов Томской области при лесозаготовках и пожарах и загрязнения атмосферы дымовыми аэрозолями с использованием дистанционных данных // Материалы 4-й Всероссийской науч. конф. с междунар. участием «Науч. основы устойчивого управления лесами». М.: Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, 2020. С. 224–227.
7. *Ершов Д. В.*, *Сочилова Е. Н.*, *Ковганко К. А.* Уточненные оценки прямых пирогенных эмиссий углерода в лесах России по данным дистанционного мониторинга с 2011 по 2023 год // Вопросы лесной науки. 2024. Т. 7. № 4. 18 с. DOI: 10.31509/2658-607x-202474-155.
8. *Забродин А. Н.*, *Пономарёв Е. И.* Вариативность интегрального теплоизлучения пожаров в условиях лиственничников Сибири // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 2. С. 166–176. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-166-176.
9. *Зайцев А. М.*, *Губский С. В.* О возникновении пожаров в лесах из-за возгорания лесного опада // Лесотехнич. журн. Воронеж. 2017. Т. 7. № 3. С. 74–84.
10. *Иванов В. А.*, *Иванова Г. А.*, *Бакшеева Е. О.*, *Шебеко Д. В.* Эмиссии при пожарах в насаждениях Среднесибирского подтаежно-лесостепного района // Сибирский лесной журн. 2024. № 5. С. 47–56. DOI: 10.15372/SJFS20240505.
11. *Касымов Д. П.* Лесная пирология. Томск: Нац. исследоват. Томский гос. ун-т, 2020. 100 с.
12. *Лоскутов С. Р.*, *Шапченкова О. А.*, *Ведрова Э. Ф.*, *Анискина А. А.*, *Мухортова Л. В.* Гигроскопические свойства подстилки хвойных и лиственных насаждений средней Сибири // Сибирский эколог. журн. 2013. Т. 20. № 5. С. 695–702.
13. *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.
14. *Пономарёв Е. И.* Пространственно-временное распределение показателей горимости растительности Сибири за период спутниковых наблюдений 1996–2023 гг. в формате векторного полигонального слоя. Свидетельство о гос. рег. базы данных № 2024622955. Рег. 05.07.2024.
15. *Пономарёв Е. И.*, *Забродин А. Н.* Способ оценки пожарного воздействия на растительность по спутниковым измерениям теплоизлучения при горении. Патент № 2855763. Рег. 02.02.2026.
16. *Пономарёв Е. И.*, *Пономарёва Т. В.* Способ оценки и картирования удельных запасов углерода в напочвенном покрове по данным спутниковых измерений мощности теплоизлучения от пожаров. Патент № 2850130. Рег. 05.11.2025.
17. *Пономарёв Е. И.*, *Швецов Е. Г.* Сопоставление оценок отпада древостоев Сибири после воздействия пожаров по дистанционным данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 6. С. 213–223. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-213-223.
18. *Пономарёв Е. И.*, *Швецов Е. Г.*, *Усатая Ю. О.* Регистрация энергетических характеристик пожаров в лесах Сибири дистанционными средствами // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 4. С. 3–11. DOI: 10.7868/S0205961417040017.
19. *Самсонов Ю. Н.*, *Беленко О. А.*, *Иванов В. А.* Дисперсные и морфологические характеристики дымовой аэрозольной эмиссии от пожаров в бореальных лесах Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 6. С. 423–431.
20. *Сныткин Г. В.* Особенности лесных пожаров в разных формациях, типах леса и методы их тушения в лесах крайнего Северо-Востока Сибири // Лесной вестн. 2001. № 5. С. 37–49.
21. *Тимофеева С. С.*, *Гармышев В. В.* Загрязнение атмосферы в результате лесных пожаров в Иркутской области // Сб. материалов заочной междунар. научно-практич. конф. «Глобализация экологич. проблем: прошлое, настоящее и будущее». Кемерово: Кузбасский гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева, 2017. 5 с.
22. *Giglio L.*, *Schroeder W.*, *Justice C. O.* The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 178. P. 31–41. DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.054.
23. *Heward H.*, *Smith A. M. S.*, *Roy D. P. et al.* Is burn severity related to fire intensity? Observations from landscape scale remote sensing // Intern. J. Wildland Fire. 2013. V. 22. No. 7. P. 910–918. DOI: 10.1071/WF12087.

24. *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. No. 1. P. 527–554. DOI: 10.5194/bg-9-527-2012.
25. *Kumar S. S.*, *Roy D. P.*, *Boschetti L.*, *Kremens R.* Exploiting the power law distribution properties of satellite fire radiative power retrievals: A method to estimate fire radiative energy and biomass burned from sparse satellite observations // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2011. V. 116. Article D19303. 18 p. DOI: 10.1029/2011JD015676.
26. *Ponomarev E. I.*, *Yakimov N. D.*, *Ponomareva T. V. et al.* Current trend of carbon emissions from wildfires in Siberia // Atmosphere. 2021. V. 12. No. 5. Article 559. DOI: 10.3390/atmos12050559.
27. *Ponomarev E.*, *Zabrodin A.*, *Ponomareva T.* Classification of fire damage to boreal forests of Siberia in 2021 based on the dNBR index // Fire. 2022. V. 5. No. 1. Article 19. DOI: 10.3390/fire5010019.
28. *Smirnov N. S.*, *Korotkov V. N.*, *Romanovskaya A. A.* Black carbon emissions from wildfires on forest lands of the Russian Federation in 2007–2012 // Russian Meteorology and Hydrology. 2015. V. 40. No. 7. P. 435–442. DOI: 10.3103/S1068373915070018.
29. *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: Atmospheres. 2005. V. 110. Article D24311. 24 p. DOI: 10.1029/2005JD006318.
30. *Wooster M. J.*, *Roberts G. J.*, *Giglio L. et al.* Satellite remote sensing of active fires: History and current status, applications and future requirements // Remote Sensing of Environment. 2021. V. 267. Article 112694. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112694.
31. *Xu W.*, *Wooster M. J.*, *He J. et al.* Major improvements in spaceborne early fire detection and small-fire FRP retrieval with the Meteosat Third Generation Flexible Combined Imager // Science of Remote Sensing. 2026. V. 13. Article 100366. DOI: 10.1016/j.srs.2026.100366.

Remote sensing data on the energy characteristics of Siberian fires in estimates of burned phytomass

E. I. Ponomarev [1, 3], A. N. Zabrodin [1], K. Yu. Litvintsev [2]

[1] *Krasnoyarsk Science Center SB RAS*, *Krasnoyarsk 660036*, *Russia*
E-mail: evg@ksc.krasn.ru
[2] *Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS*, *Novosibirsk 630090*, *Russia*
[3] *Siberian Federal University*, *Krasnoyarsk 660041*, *Russia*

The paper evaluates the agreement of combustible forest fuel stock estimates by employing an approach that emphasizes the interpretation of the recorded fire radiative energy (FRE), as well as alternative calculations that are based on the fire area and pre-fire phytomass reserves. The energy characteristics of fires in several Siberian forest regions were analyzed using data from the standard Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) product. The sample comprised 25 fires recorded in 2018, 2020–2022, and 2024, with a total area of 1.6 million hectares. The study utilized data on heat power of active fire zones calculated using the fire radiative power (FRP) method. To determine the FRE, the FRP data series were integrated over time. The discrepancies between the calculated burned phytomass M_{FRE} and mass of burned combustible forest fuel M_S values for the analyzed sample of fires ranged from 5 to 46 %, with an average of 26 %. The residual variability in the analysis for individual regions was recorded in the range of 10–31 %. A Pearson correlation coefficient $r = 0.85$ ($p < 0.1$) was obtained after applying the proposed approach to the Siberian forest fire database for the period 2001–2025 and recalculating into direct fire emissions volumes. The analyzed series exhibited a relatively low discrepancy between data sets. The interannual values of phytomass burned in Siberian fires were obtained within the range of 100–500 million tons. The emissions from forest fires were recorded within the $C_{FRE} = 24...189$ Tg/year range, with an average of 79±19 Tg/year, which is consistent with the known variability of phytomass/emissions values. The results based on the interpretation of the recorded thermal radiation energy of a fire and alternative calculations are linearly approximated with a reliability $R^2 = 0.72$ ($p < 0.1$), which confirms the applicability of the approach based on the analysis of FRE for solving this class of problems.

Keywords: forest fires, fire radiative power, fire radiative energy, FRP, FRE, fire impact, phytomass, Siberia

Accepted: 05.06.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-155-167

References

1. Alekseev V. A., Birdsey R. A., *Uglerod v ehkosistemakh lesov i bolot Rossii* (Carbon in the ecosystems of forests and swamps in Russia), *Krasnoyarsk: TOO "EhCOS"*, 1994, 226 p. (in Russian).
2. Alekseeva M. N., Pustovalov K. N., Golovatskaya E. A., Yaschenko I. G., Calculation of aerosol emissions from fires in the Tomsk region based on remote sensing data, *Atmospheric and oceanic optics*, 2021, V. 34, No. 1, pp. 68–73, DOI: 10.1134/S1024856021010024.
3. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., Egorov V. A., Loupian E. A., Satellite-based assessment of Russian forest fire mortality, *Lesovedenie*, 2015, No. 2, pp. 83–94 (in Russian).
4. Belkova T. A., Perminov V. A., Alekseev N. A., On the issue of improving the methodology for assessing environmental damage from forest fires, *Materialy 7-i Mezhregional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti: nauka*, *obrazovanie*, *praktika"* (Proc. 7th Interregional Scientific and Practical Conf. with Intern. Participation "Life Safety: Science, Education, Practice"), Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhalin State University, 2017, pp. 137–140 (in Russian).
5. Valendik E. N., Sukhinin A. I., Kosov I. V., *Vliyanie nizovykh pozharov na ustoichivost' khvoinykh porod* (The impact of ground fires on the stability of coniferous species), Krasnoyarsk: Institut lesa imeni V. N. Sukacheva SO RAN, 2006, 98 p. (in Russian).
6. Golovatskaya E. A., Alekseeva M. N., Yashchenko I. G., Pustovalov K. N., Assessment of forest losses in the Tomsk region due to logging and fires and atmospheric pollution by smoke aerosols using remote sensing data, *Materialy 4-i Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* (Proc. of the 4th All-Russian scientific conf. with intern. part. "Scientific foundations of sustainable forest management"), Moscow: Center for Forest Ecology and Productivity RAS, 2020, pp. 224–227 (in Russian).
7. Ershov D. V., Sochilova E. N., Kovganko K. A., Refined estimates of direct pyrogenic carbon emissions in Russian forests based on remote monitoring data from 2011 to 2023, *Forest Science Issues*, 2024, V. 7, No. 4, 18 p. (in Russian), DOI: 10.31509/2658-607x-202474-155.
8. Zabrodin A. N., Ponomarev E. I., Variability of fire radiative power under the conditions of burning in larch forests of Siberia, *Cosmic Research*, 2024, V. 62, pp. S172–S179, DOI: 10.1134/S0010952524601129.
9. Zaitsev A. M. Gubskiy S. V., On the occurrence of forest fires due to the ignition of forest litter, *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2017, V. 7, No. 3, pp. 74–84 (in Russian), DOI: 10.12737/article_59c228bacea279.57488196.
10. Ivanov V. A., Ivanova G. A., Baksheeva E. O., Shebeko D. V., Emissions from fires in the stands of central Siberian subtaiga-forest-steppe region, *Siberian J. Forest Science*, 2024, No. 5, pp. 47–56 (in Russian), DOI: 10.15372/SJFS20240505.
11. Kasymov D. P., *Lesnaya pirologiya* (Forest pirology), Tomsk: Natsional'nyi issledovatel'skii Tomskii gosudarstvennyi universitet, 2020, 100 p. (in Russian).
12. Loskutov S. R., Shapchenkova O. A., Vedrova E. F. et al., Hygroscopic properties of the litter of coniferous and deciduous stands in central Siberia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2013, V. 6, No. 5, pp. 525–531, DOI: 10.1134/S1995425513050089.
13. Loupian E. A., Lozin D. V., Balashov I. V. et al., A study of the dependence of the degree of forest damage by fires on the intensity of burning according to satellite-monitoring data, *Cosmic research*, 2022, V. 60, pp. S46–S56, DOI: 10.1134/s001095252270006x.
14. Ponomarev E. I., *Prostranstvenno-vremennoe raspredelenie pokazatelei gorimosti rastitel'nosti Sibiri za period sputnikovykh nablyudenii 1996–2023 gg. v formate vektornogo poligonal'nogo sloya* (Spatiotemporal distribution of vegetation fire indicators in Siberia for the satellite observation period 1996–2023 in the format of a vector polygonal layer), Certificate of state registration of database No. 2024622955 (RU), Reg. 05.07.2024 (in Russian).
15. Ponomarev E. I., Zabrodin A. N., *Sposob otsenki pozharnogo vozdeistviya na rastitel'nost' po sputnikovym izmereniyam teploizlucheniya pri gorenii* (A method for assessing the impact of fire on vegetation using satellite measurements of thermal radiation during combustion), Patent No. 2855763 (RU), Reg. 02.02.2026 (in Russian).
16. Ponomarev E. I., Ponomareva T. V., *Sposob otsenki i kartirovaniya udel'nykh zapasov ugleroda v napochvennom pokrove po dannym sputnikovykh izmerenii moshchnosti teploizlucheniya ot pozharov* (A method for esti-

mating and mapping specific carbon stocks in ground cover using satellite measurements of heat radiation from fires), Patent No. 2850130 (RU), Reg. 05.11.2025 (in Russian).
17. Ponomarev E. I., Shvetsov E. G., Comparison of estimates of post-fire forest mortality in Siberia based on remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 6, pp. 213–223 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-213-223.
18. Ponomarev E. I., Shvetsov E. G., Usataya Y. O., Determination of the energy properties of wildfires in Siberia by remote sensing, *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018, V. 54, No. 9, pp. 979–985, DOI: 10.1134/S000143381809030X.
19. Samsonov Y. N., Belenko O. A., Ivanov V. A., Dispersal and morphological characteristics of smoke particulate emission from fires in the boreal forests of Siberia, *Atmospheric and oceanic optics*, 2010, V. 23, No. 6, pp. 485-493, DOI:10.1134/S1024856010060084.
20. Snytkin G. V., Features of forest fires in different formations, forest types and methods of extinguishing them in the forests of the far north-east of Siberia, *Lesnoi vestnik*, 2001, No. 5, pp. 37–49 (in Russian).
21. Timofeyeva S. S., Garmyshev V. V., Air pollution from forest fires in the Irkutsk region, *Sbornik materialov zaochnoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Globalizatsiya ehkologicheskikh problem: proshloe, nastoyashchee i budushchee"* (Proc. Intern. Scientific and Practical Conf. "Globalization of Environmental Problems: Past, Present, and Future"), Kemerovo: Kuzbasskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. T. F. Gorbacheva, 2017, 5 p. (in Russian).
22. Giglio L., Schroeder W., Justice C. O., The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products, *Remote Sensing of Environment*, 2016, V. 178, pp. 31–41, DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.054.
23. Heward H., Smith A. M. S., Roy D. P. et al., Is burn severity related to fire intensity? Observations from landscape scale remote sensing, *Intern. J. Wildland Fire*, 2013, V. 22, No. 7, pp. 910–918, DOI: 10.1071/WF12087.
24. 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, No. 1, pp. 527–554, DOI: 10.5194/bg-9-527-2012.
25. Kumar S. S., Roy D. P., Boschetti L., Kremens R., Exploiting the power law distribution properties of satellite fire radiative power retrievals: A method to estimate fire radiative energy and biomass burned from sparse satellite observations, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, V. 116, Article D19303, 18 p., DOI: 10.1029/2011JD015676.
26. Ponomarev E. I., Yakimov N. D., Ponomareva T. V. et al., Current trend of carbon emissions from wildfires in Siberia, *Atmosphere*, 2021, V. 12, No. 5, Article 559, DOI: 10.3390/atmos12050559.
27. Ponomarev E., Zabrodin A., Ponomareva T., Classification of fire damage to boreal forests of Siberia in 2021 based on the dNBR index, *Fire*, 2022, V. 5, No. 1, Article 19, DOI: 10.3390/fire5010019.
28. Smirnov N. S., Korotkov V. N., Romanovskaya A. A., Black carbon emissions from wildfires on forest lands of the Russian Federation in 2007–2012, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2015, V. 40, No. 7, pp. 435–442, DOI: 10.3103/S1068373915070018.
29. 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: Atmospheres*, 2005, V. 110, Article D24311, 24 p., DOI: 10.1029/2005JD006318.
30. Wooster M. J., Roberts G. J., Giglio L. et al., Satellite remote sensing of active fires: History and current status, applications and future requirements, *Remote Sensing of Environment*, 2021, V. 267, Article 112694, DOI: 10.1016/j.rse.2021.112694.
31. Xu W., Wooster M. J., He J. et al., Major improvements in spaceborne early fire detection and small-fire FRP retrieval with the Meteosat Third Generation Flexible Combined Imager, *Science of Remote Sensing*, 2026, V. 13, Article 100366, DOI: 10.1016/j.srs.2026.100366.