

Вариативность интегрального теплоизлучения пожаров в условиях лиственничников Сибири

А. Н. Забродин, Е. И. Пономарёв

Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск, 660036, Россия

E-mails: azabrodin@ksc.krasn.ru, evg@ksc.krasn.ru

Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, Россия

Исследована вариативность теплоизлучения от пожаров в лиственничных древостоях Сибири (в границах 60–65° с. ш., 100–130° в. д.). Работа выполнялась на основе выборки семи наиболее крупных пожаров общей площадью 10 тыс. км², зафиксированных в 2018, 2020 и 2021 гг. Для сравнения анализировалась выборка пожаров, зарегистрированных в 2015–2021 гг. (29 пожаров на общей площади до 18 тыс. км²), с привязкой к другим распространённым вариантам растительных покровов Сибири: лиственничным редколесьям, насаждениям сосны, ели, сосны сибирской (кедра), а также тундровой растительности и кедрового стланика. В работе использовались данные о мощности излучения активных зон пожара, вычисляемые по методике FRP (*англ.* Fire Radiative Power) стандартных продуктов MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Зафиксировано, что горимость лиственничных древостоев Сибири превышает ту же характеристику для других древостоев не менее чем в два раза. Показано, что квазинормальный вид распределения значений FRP характерен для всех «крупных» пожаров, к категории которых относятся пожары в лиственничниках Сибири. Выявлено, что значения FRP от пожаров в лиственничниках могут варьировать от 12 тыс. до >260 тыс. МВт. При этом спорадические экстремумы интегрального теплоизлучения (FRP_{инт}) на порядок превышают значения, соответствующие иным вариантам растительности Сибири. Средние значения FRP для пикселя MODIS при пожарах в лиственничниках на 15 % превышают этот показатель для сосновых древостоев и на 25–35 % — характерные значения для пожаров в темнохвойных лесах. Связь FRP_{инт} с площадью активного горения аппроксимируется линейной функцией с достоверностью не ниже 0,6 ($p < 0,05$). В то же время, как накопительный итог за весь период развития пожара, величина FRP_{инт} логарифмически зависит от итоговой выгоревшей площади. На основе такой зависимости можно оценивать характерное время реализации трёх фаз динамики пожара не только по площади, но и по энергетическим характеристикам в терминах теплоизлучения.

Ключевые слова: лесные пожары, лиственничники, радиационная мощность излучения, FRP, интегральное теплоизлучение от пожара, Сибирь

Одобрена к печати: 07.03.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-166-176

Введение

Лесные пожары (ЛП) — наиболее значимый природный фактор, определяющий состояние и сукцессионную динамику лесов Сибири (Швиденко, Щепашенко, 2013; Ропомарев et al., 2016). В связи с вероятными климатическими изменениями влияние пожаров в ближайшей перспективе будет только усиливаться.

По разным оценкам, статистика пожаров на территории Сибири — это от 70 до 90 % ежегодных площадей, пройденных огнём в лесах России (Лупян и др., 2021; Швиденко, Щепашенко, 2013). Показано (Krylov et al., 2014), что ежегодно до 30 % послепожарных территорий сопровождаются отпадом и последующим замещением древостоев на площадях до 1,5–3,0 млн га (Барталёв, Стыщенко, 2021; Ропомарев et al., 2022).

В настоящее время регулярно получаемые дистанционные данные стали важнейшим инструментом сбора сведений о пожарах и проявлениях послепожарных процессов в лесах Сибири (Пономарев и др., 2017а). Так, классификация послепожарных полигонов на снимках со спутников на основе спектрального нормализованного индекса NBR (*англ.* Normalized Burn Ratio) и разностного нормализованного индекса гарей dNBR (*англ.* differenced NBR) по-

зволяет характеризовать степень нарушенности в зависимости от типа пожара и интенсивности горения (Барталёв, Стыценко, 2021; Лупян и др., 2022; Ponomarev et al., 2022). Показано также (Ponomarev et al., 2020), что динамика послепожарных нарушений эффективно контролируется и по снижению отражательной способности поверхности (альбедо), и по долговременным тепловым аномалиям, характерным для послепожарных участков.

При классификации степени повреждения древостоев при разных видах пожаров используются измерения мощности теплоизлучения зон активного горения, фиксируемые дистанционными средствами (Лупян и др., 2022; Пономарев и др., 2017б; Ponomarev et al., 2022) и основанные на применении технологии FRP/FRE (*англ.* Fire Radiative Power/Fire Radiative Energy) (Kumar et al., 2011; Wooster et al., 2005). Предварительные исследования подтверждают значимую связь между интенсивностью пожаров (в терминах FRP/FRE) и степенью нарушенности (в терминах dNBR), выявленную для пожаров во всех доминирующих вариантах растительности Сибири (Забродин, Пономарев, 2023). Кроме того, с помощью измерений FRP можно выполнять оценку интенсивности горения на разных стадиях развития пожара. При этом значения радиационной мощности FRP напрямую связаны как с характеристикой интенсивности горения, так и со скоростью выгорания биомассы (Wooster et al., 2005), что необходимо учитывать при калибровке вычислений объёмов пожарных эмиссий (Ponomarev et al., 2023).

Однако в условиях Сибири наблюдается широкая вариативность характеристик пожаров и наблюдаемых послепожарных эффектов, связанная со значительным спектром лесорастительных условий. Поэтому детализация регистрируемых характеристик для пожаров в различных древостоях является важной научной задачей. В этой связи актуален анализ, выполненный в настоящем исследовании для наиболее крупных пожаров в широко представленных в Сибири лиственничных (*Larix sibirica*, *L. gmelinii*) древостоях.

В работе рассмотрены следующие аспекты вопроса: 1) количественно описаны особенности временной динамики FRP при пожарах в лиственничниках; 2) проверена гипотеза о квазинормальности распределения значений FRP за время развития пожара в условиях лиственничных древостоев Сибири; 3) выполнена аппроксимация зависимости интегральных значений FRP от площади активного горения; 4) исследованы характерные фазы развития пожара в лиственничниках в терминах динамики интегральных значений FRP.

Исходные данные и методы обработки

Работа выполнена на примере выборки пожаров, зарегистрированных на территории Сибири (в границах полигона 60–65° с. ш., 100–130° в. д.) с преобладанием лиственничных (*Larix sibirica*, *L. gmelinii*) лесов (*рис. 1*, см. с. 168). Для контроля доминирующих древостоев и привязки пожаров к вариантам растительности использовалась карта леса «Вега-Pro» (<http://pro-vega.ru/maps>, дата обращения 10.01.2024) и стандартные процедуры ГИС (геоинформационная система).

Предварительные сведения для реализации выборки пожаров были получены на основе ежегодно пополняющейся с 1996 г. базы данных спутникового мониторинга пожаров Института леса и Красноярского научного центра СО РАН (Красноярск, Россия) (Пономарев и др., 2017а). Сегодня это один из самых продолжительных рядов наблюдений за пожарами (~7·10⁶ записей за период 1996–2023 гг.), который содержит уникальные атрибутивные характеристики пожаров, зафиксированные спутниковыми средствами (Пономарев, Швецов, 2015). Материалы банка данных обобщают результаты обработки спутниковых съёмки NOAA/AVHRR (*англ.* Advanced Very High Resolution Radiometer/National Oceanic and Atmospheric Administration) (с 1996 г.) и Terra/Aqua/MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (с 2007 г. по настоящее время). Дополнительно пространственные характеристики пожаров уточнялись по снимкам Landsat-8/OLI/TIRS (*англ.* Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor) из открытых каталогов (<https://earthexplorer.usgs.gov>, дата обращения 10.01.2024).

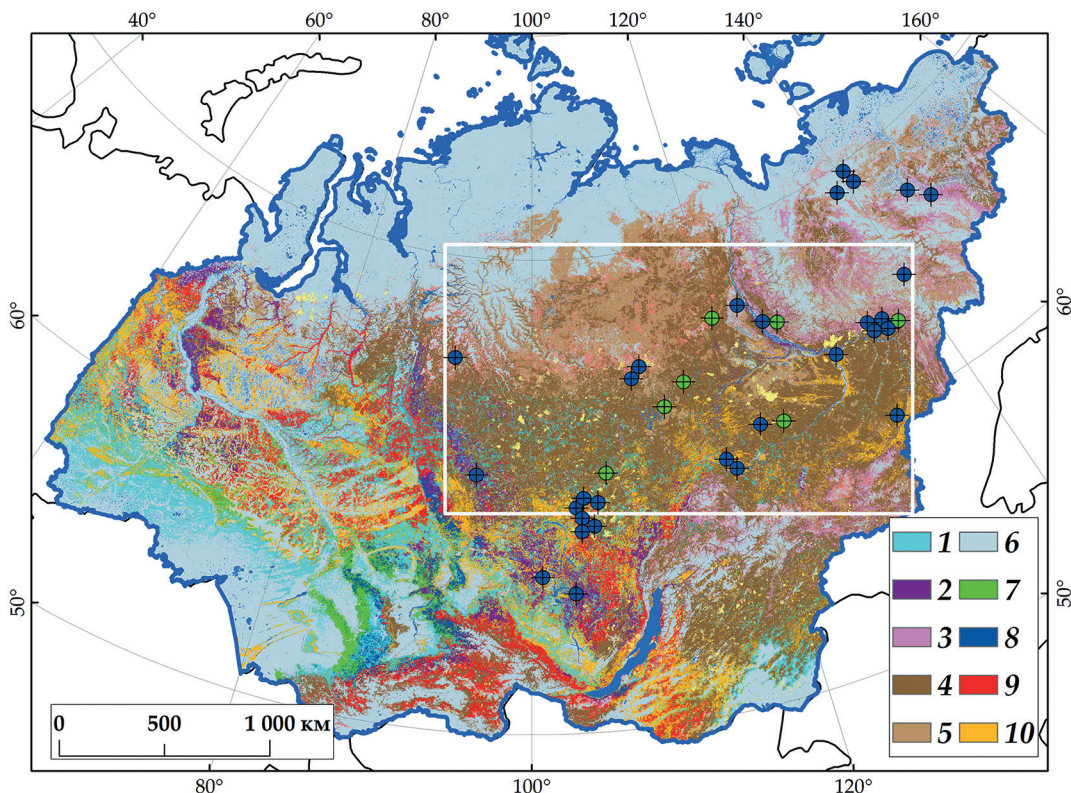


Рис. 1. Территория Сибири и район интересов с картой растительности по материалам сервиса «Vega-Pro» (<http://pro-vega.ru/maps>): 1 — берёза (*Betula* spp.); 2 — ель (*Picea obovata*); 3 — кедровый стланик (*Pinus pumila*); 4 — лиственница (*Larix sibirica*); 5 — лиственничные редколесья (*Sparse larch*); 6 — тундра (*Tundra vegetation, Pinus pumila*); 7 — осина (*Populus tremula*); 8 — пихта (*Abies sibirica*); 9 — сосна сибирская (кедр) (*Pinus sibirica*); 10 — сосна (*Pinus sylvestris*). Символами двух цветов обозначена выборка пожаров в лиственничниках (зелёный символ) и других древостоях (синий символ)

Выборка пожаров для древостоев с доминированием лиственницы содержала семь событий пожаров общей площадью $1,0 \cdot 10^4 \text{ км}^2$, зафиксированных в 2018, 2020 и 2021 гг. Площади пожаров (S) в лиственничниках Сибири, распространяющихся, как правило, в течение значительного времени, на порядок превышают критерий «крупных» пожаров ($S \gg 20 \text{ км}^2$), что обуславливает большое количество дистанционных попиксельных измерений мощности теплоизлучения в границах каждого пожарного события. В нашем случае объём обработанного ряда данных о FRP превышал $1,75 \cdot 10^5$ значений, которые фиксировались для каждого пожара выборки в течение 15–57 сут. Радиационная мощность FRP активных зон горения, зарегистрированная в режиме реального времени спутниковыми системами Aqua, Terra/MODIS, была доступна из стандартных продуктов коллекции 6 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>, дата обращения 10.12.2023).

В стандартных продуктах MODIS коллекции 5 метод определения мощности излучения (FRP_{c5}) зон активного горения (Freeborn et al., 2014) использует соотношение:

$$FRP_{c5} = A_{pix} \beta (T_f^8 - T_b^8),$$

где T_f^8 — яркостная температура пикселя пожара при длине волны $\lambda \approx 4 \text{ мкм}$; T_b^8 — средняя яркостная температура фонового окна при длине волны $\lambda \approx 4 \text{ мкм}$; A_{pix} — номинальная площадь пикселя MODIS, оценённая для заданного угла сканирования; $\beta = 4,34 \cdot 10^{-19} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-8}$ — коэффициент спектрального отклика MODIS.

Исходя из этого подхода, FRP_{c5} для пикселя изображения имеет единицу измерения:

$$[FRP_{c5}] = [m^2 \cdot \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-8} \cdot (\text{К}^8)] = [\text{Вт}].$$

Для стандартного продукта коллекции 6 метод определения мощности излучения (FRP_{c6}) (Giglio et al., 2016) был модифицирован:

$$FRP_{c6} = \frac{A_{pix} \sigma}{a \tau_4} (L_4 - \bar{L}_4),$$

где A_{pix} — площадь пикселя MODIS с учётом угла сканирования; $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ — постоянная Стефана – Больцмана; L_4 — энергетическая яркость термически активного пикселя в канале 21 радиометра MODIS (длина волны $\lambda \approx 4 \text{ мкм}$), $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}$; \bar{L}_4 — энергетическая яркость фона в том же диапазоне, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}$; $a = 3 \cdot 10^{-9} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{К}^{-4}$ — эмпирическая постоянная для датчика MODIS; τ_4 — атмосферный коэффициент пропускания канала 4 мкм.

Таким образом, FRP_{c6} также имеет единицу измерения:

$$[FRP_{c6}] = \left[\frac{\text{м}^2 \cdot \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}}{\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{К}^{-4}} (\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}) \right] = [\text{Вт}].$$

Исходя из этого, параметр $FRP = FRP_{c5} \approx FRP_{c6}$ определён как мощность теплоизлучения в 1 пикселе изображения. В настоящей работе мы не затрагивали вопрос оценки энергии пожаров, поскольку измерения FRP дискретны и пересчёт на основе этих данных выделяющей энергии (FRE) выступает самостоятельной задачей.

Для сравнения была реализована дополнительная выборка пожаров с привязкой к другим распространённым вариантам растительных покровов Сибири: лиственничным редколесьям, насаждениям сосны, ели, сосны сибирской (кедра), а также тундровой растительности и кедрового стланика. Для этих вариантов растительности также рассмотрены ряды FRP для пожаров, зафиксированных в 2015–2021 гг. (всего 29 пожаров общей площадью до $1,8 \cdot 10^4 \text{ км}^2$).

По результатам многолетних спутниковых наблюдений (Ponomarev et al., 2016) показано, что в среднем ежегодная площадь пожаров Сибири варьирует на уровне ~ 10 млн га. Пожары в лиственничниках составляют не менее 60–70 % этой площади, ежегодно это до 7 млн га. Таким образом, рассматриваемая выборка пожаров на общей площади ~ 1 млн га составляет не менее 14 % от ежегодных площадей пожаров в лиственничниках. В этом смысле анализируемую выборку следует считать репрезентативной. С другой стороны, рассматривая репрезентативность по критерию числа пожаров, необходимо учесть ограниченную долю экстремальных пожаров категории «крупные» ($S \gg 20 \text{ км}^2$), которые в общей статистике составляют 4–8 %. Ежегодно на территории Сибири реализуются ~ 400 таких пожарных событий, при этом в лиственничниках — около 40 %, т. е. рассматриваемая выборка составила не менее 4 %, что также обеспечивает выполнение критерия репрезентативности.

Для общей характеристики пожарного воздействия на различные древостои Сибири был использован относительный показатель горимости ($\gamma = (S_{\text{лп}} / S_{\text{лес}}) \times 100 \%$), вычисляемый как отношение общей площади пожаров ($S_{\text{лп}}$) к площади каждого из рассмотренных вариантов растительного покрова ($S_{\text{лес}}$) в среднем за пожароопасный сезон на интервале 1996–2023 гг.

Для количественного описания особенностей временной динамики FRP при пожарах в лиственничниках проверена гипотеза о нормальности распределения значений FRP за время развития каждого пожара выборки. С этой целью были построены гистограммы реализации значений FRP с использованием стандартной функции распределения Гаусса (Hawkins, 2014).

Далее, для рядов данных, имеющих свойства квазинормального распределения, применимы стандартные подходы статического анализа. Во-первых, мы оценили средние значения, дисперсию и стандартное отклонение для каждого i -го дня регистрации активной зоны пожаров, что характеризует статистику посуточных суммарных значений FRP . Затем спорадические максимумы теплоизлучения и их долю в общем ряду данных определяли как значения, превышающие средние на три стандартных отклонения (3σ), т. е. те значения, которые

в соответствие с правилом трёх сигм не входят в число 99,7 % всей выборки. Наконец, интегральное значение $FRP_{инт}$ рассчитывалось как сумма значений FRP за все дни периода регистрации пожара.

Представленные в работе результаты основаны на анализе сумм значений FRP по всем точкам (пикселям) в границах каждого пожара за весь период развития горения. $FRP_{инт}$ рассчитывалось как сумма значений FRP по всем пикселям за период регистрации пожара. При этом в работе анализируются также усреднения посуточных данных ($FRP_{ср}$), т.е. значения параметра со всех активных точек в течение одних суток, а также сведения о среднепиксельных значениях $FRP_{пикс}$, которые характеризуют средний уровень фиксируемого теплоизлучения с 1 пикселя пожара для различных древостоев.

Выбор функции аппроксимации зависимости интегральных значений FRP от площади активного горения выполнялся с учётом коэффициента достоверности аппроксимации (R^2) стандартными средствами Microsoft Excel.

На основе графиков увеличения интегральных значений FRP от времени развития пожара выделяли три характерные фазы, отражающие начало пожара, фазу активного развития пожара и заключительную фазу самопроизвольного затухания, косвенно отражённые в терминах динамики интегральных значений $FRP_{инт}$.

Дополнительно полученные характеристики энергетических признаков пожаров в лиственничниках сравнивались с результатами обработки рядов FRP для пожарных событий в других вариантах растительных покровов.

Результаты и обсуждение

Сопряжённый ГИС-анализ базы данных пожаров 1996–2023 гг. и векторных карт растительности позволяет констатировать, что многолетний максимум показателя горимости в Сибири ($\gamma = 0,69 \%$) характерен для территорий с доминированием лиственничных насаждений (табл. 1).

Таблица 1. Соотношение числа, площади пожаров и показателя горимости (γ , %) по доминирующим древостоям Сибири, усреднение за 1996–2023 гг.

Варианты растительного покрова	Число пожаров, % от общего	Площадь, % от общей	γ , %
Лиственница (<i>Larix sibirica</i> , <i>L. gmelinii</i>)	43,2	58,0	0,69
Сосна (<i>Pinus sylvestris</i>)	26,0	20,5	0,22
Лиственные (<i>Populus tremula</i> , <i>Betula spp.</i>)	20,6	12,5	0,30
Темнохвойные (<i>Pinus sibirica</i> , <i>Abies sibirica</i> , <i>Picea obovata</i>)	7,0	8,5	0,10
Лесотундра (<i>Pinus pumila</i>)	3,2	0,5	0,33

До 58 % площадей ежегодных пожаров Сибири приходится на лиственничные леса. Важно отметить, что значительный процент послепожарных нарушений не всегда оказывается фактическим показателем последующей гибели древостоя. В этой связи важно иметь категоризацию воздействия огня на древостой, какую обеспечивает учёт регистрируемого теплоизлучения (Лупян и др., 2022; Пономарев et al., 2022).

Пример визуализации подекадной вариации измерений FRP для исследуемого пожара приведён на рис. 2 (см. с. 171).

Для рассмотренной выборки пожаров в лиственничниках гистограммы реализации значений суммарного FRP для каждого дня горения соответствуют квазинормальному распределению и аппроксимировались функцией Гаусса (Hawkins, 2014) (рис. 3, см. с. 171). Можно обоснованно предположить, что такой вид распределения характерен для всех «крупных» пожаров ($S \gg 20 \text{ км}^2$), к категории которых относятся пожары в лиственничниках Сибири.

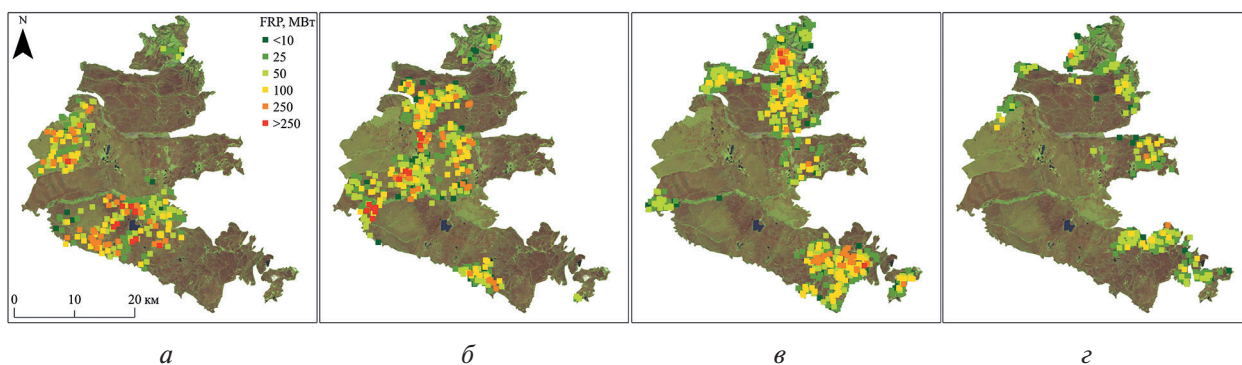


Рис. 2. Подекадная динамика теплоизлучения на участке, пройденном пожаром с 22 июня по 23 августа 2020 г.: а — за период с 1 по 10-й день; б — за период с 10-го по 20-й день; в — за период с 20-го по 30-й день; г — за период с 30-го по 41-й день

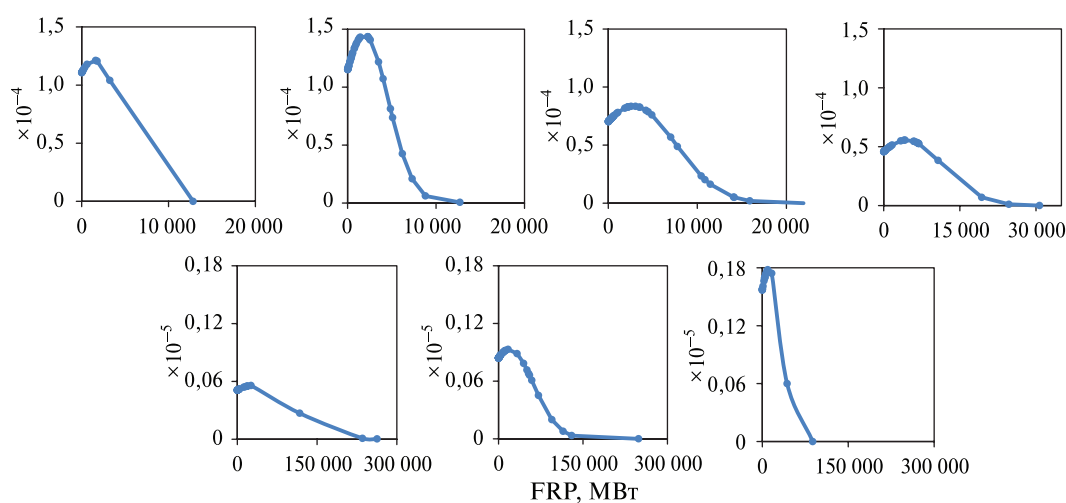


Рис. 3. Плотность вероятности реализации посуточных усреднённых значений FRP при пожарах в лиственничниках Сибири, аппроксимированная функцией Гаусса. Графики соответствуют семи пожарам рассмотренной выборки. Верхний ряд — пожары № 1, 3, 4, 7. Нижний ряд — пожары № 2, 5, 6 (см. табл. 2)

Период регистрации пожаров варьировал от 15 до 57 сут (табл. 2). Усреднение FRP посуточно для каждого дня регистрации активной зоны пожаров составило $\sim(10 \pm 22) \cdot 10^3$ МВт. Большая дисперсия значений, по всей вероятности, определяется вариативностью режима горения и переменной интенсивностью, зависящей как от «пиралогической зрелости» (понятие, принятое в пирологии для категоризации пожароопасного состояния по уровню влагосодержания) горючих материалов, так и от фактического объёма доступной для сгорания растительной биомассы. Выявлены максимальные значения теплоизлучения (FRP_{max}) для всех пожаров. В общем ряду данных выделялись спорадические экстремумы, т. е. те значения, которые в соответствии с правилом трёх сигм не входят в число 99,7 % значений всей выборки. Для рассмотренной выборки пожаров в лиственничниках доля спорадических экстремумов (доля СЭ) не превышала 2–6 % (в среднем $\sim 3,5$ %) (см. табл. 2).

Посуточные усреднения значений FRP в течение рассмотренного периода для каждого пожара варьировали в диапазоне от $12 \cdot 10^3$ до $263 \cdot 10^3$ МВт, а пределы интегрального FRP_{int} составили $(21-1083) \cdot 10^3$ МВт. По нашему мнению, большой разброс значений определяется исключительно внешними условиями отдельных пожароопасных сезонов, определяющими степень «пиралогической зрелости» лесных горючих материалов в районе регистрации пожаров.

Таблица 2. Посуточные усреднения значений теплоизлучения (FRP) для выборки пожаров в лиственничных насаждениях

Пожар	Площадь, км ²	Период регистрации, дни	Усреднение посуточных данных, ×10 ³ МВт				FRP _{инт} , ×10 ³ МВт
			FRP _{ср}	±σ	FRP _{max}	Доля СЭ, %	
1	123	15	1,4	3,0	12,8	6,0	21
2	925	41	1,9	2,7	12,7	2,0	77
3	996	17	11,0	22,0	88,0	6,0	195
4	1277	34	4,5	7,0	31,0	3,0	154
5	2159	24	31,0	71,0	263,0	4,0	746
6	3321	56	19,0	43,0	249,0	2,0	1083
7	1225	57	2,8	4,7	22,0	2,0	161
Среднее	1432	35	10,0	22,0	97,0	3,5	349

По результатам анализа дополнительно рассмотренной выборки пожаров, в том числе в иных растительных условиях Сибири, установлено, что интегральные значения FRP_{инт} пожаров могут варьировать в широких пределах при средних значениях от (350±263)·10³ МВт в светлохвойных насаждениях до (70,0±26)·10³ МВт в условиях тундровой растительности и до (19,0±2,5)·10³ МВт в темнохвойных насаждениях (табл. 3). При этом спорадические экстремумы интегрального теплоизлучения от пожаров в лиственничниках (1083·10³ МВт) на порядок превышают значения, соответствующие иным вариантам растительности Сибири.

Таблица 3. Обобщённая статистика FRP для вариантов растительности

Растительность	Выборка пожаров	Количество измерений FRP, тыс.	Среднепиксельные значения FRP _{пикс} (±σ), МВт	Среднее без учёта экстремума		Спорадический экстремум FRP _{инт} , ×10 ³ МВт
				FRP _{инт} , ×10 ³ МВт	σ, ×10 ³ МВт	
Лиственница	7	17,86	82±48	349,0	263,0	1083
Лиственничные редколесья	5	2,89	71±34	473,0	27,0	119
Сосна	6	2,10	69±37	35,0	8,0	141
Ель	3	0,85	62±65	16,0	10,0	31
Сосна сибирская (кедр)	5	0,83	43±20	19,0	2,5	79
Кедровый стланик	5	4,44	57±10	65,0	10,0	217
Тундра	5	6,14	51±7	72,0	26,0	205

Присутствие высоких значений характеристики FRP_{инт} (см. табл. 3), прежде всего, определяют значительные площади пожаров в лиственничниках Сибири. При этом состав и состояние запасов горючих материалов в разных древостоях также являются важными параметрами, влияющими на интенсивность пожара и, следовательно, на регистрируемые значения теплоизлучения зон активного горения. Количественный анализ средних попиксельных значений FRP для всех вариантов рассмотренных древостоев (см. табл. 3) позволяет отметить, что среднепиксельные значения FRP_{пикс} при пожарах в лиственничниках на 15 % превышают этот показатель для сосновых древостоев и на 25–35 % — характерные значения для пожаров в темнохвойных лесах.

В анализе зависимости интегральных значений FRP от посуточной площади активного горения мы рассмотрели два варианта связи (рис. 4, см. с. 173). Во-первых, установлено,

что $FRP_{инт}$ в посуточном обобщении аппроксимируется линейной функцией с достоверностью не ниже $R^2 = 0,6$ ($p < 0,05$) (см. рис. 4а). Выполнена также аппроксимация интегральных значений FRP накопительным итогом за весь период развития пожара, увеличивающаяся с ростом итоговой площади пожара. В этом случае с учётом снижения интенсивности горения на финальной стадии развития пожара функция аппроксимации закономерно меняется на логарифмическую (см. рис. 4б). При этом, анализируя закономерности роста интегральной величины FRP в течение периода развития наиболее продолжительных и крупных пожаров (рис. 5), можно оценивать периоды трёх выделяемых фаз в динамике не только площади пожара, но и его энергетических характеристик в терминах теплоизлучения. Во-первых, это фаза, отражающая начало пожара (~7–8 сут), далее — фаза активного развития пожара и значительного роста интегрального теплоизлучения, а также заключительная фаза самопроизвольного затухания (~9–10 сут), когда значение интегрального FRP не увеличивается даже при росте площади (см. рис. 5, красная кривая), вероятно, из-за низких значений FRP в остаточных очагах тления. При этом, в отличие от показанного примера пожара (см. рис. 5), в большинстве случаев рассмотренной выборки пожаров в условиях заключительной фазы площадь горения, как правило, демонстрирует значительно меньший рост. Можно констатировать, что около 5–8 % от общей картины распределения составило накопление первой и третьей фаз и более 90 % интегральной величины FRP достигается в течение второй фазы пожара.

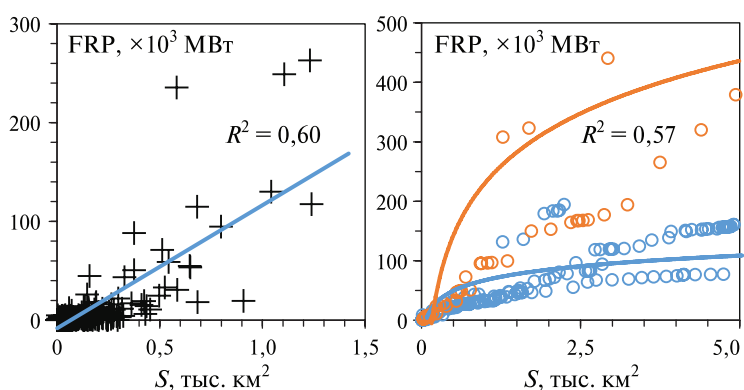


Рис. 4. Аппроксимация зависимости FRP от площади пожара для данных, обобщённых посуточно (а), и для значений за весь период развития пожара (б)

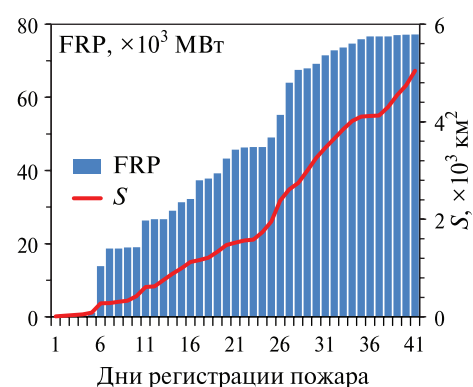


Рис. 5. Пример динамики интегральной величины FRP в течение периода развития пожара

Заключение

По данным многолетнего мониторинга за 1996–2023 гг. можно утверждать, что 58 % ежегодных площадей пожаров Сибири приходится на лиственничные леса, для которых средне-многолетний показатель горимости ($\gamma = 0,69$ %) превышает ту же характеристику для других древостоев не менее чем в два раза.

Установлено, что значения FRP в течение развития пожара могут достигать от $12 \cdot 10^3$ до $263 \cdot 10^3$ МВт. Пределы интегральной величины $FRP_{инт}$ составляли $(21–1083) \cdot 10^3$ МВт в зависимости от внешних условий пожароопасных сезонов. Количественно показано, что спорадические экстремумы интегрального теплоизлучения от пожаров в лиственничниках ($1083 \cdot 10^3$ МВт) на порядок превышают значения, соответствующие иным вариантам растительности Сибири. Среднепиксельные значения $FRP_{пикс}$ при пожарах в лиственничниках на 15 % превышают этот показатель для сосновых древостоев и на 25–35 % — характерные значения для пожаров в темнохвойных лесах.

Гистограммы плотности вероятности значений FRP соответствуют виду квазинормального распределения и аппроксимируются функцией Гаусса. Можно предположить, что такой

вид распределения характерен для всех «крупных» пожаров ($S \gg 20 \text{ км}^2$), к категории которых относятся пожары в лиственничниках Сибири.

При посуточном обобщении связь роста значений $FRP_{\text{инт}}$ с площадью активного горения аппроксимируется линейной функцией с достоверностью не ниже $R^2 = 0,6$ ($p < 0,05$). В то же время накопительным итогом за весь период развития пожара величина $FRP_{\text{инт}}$ логарифмически зависит от итоговой выгоревшей площади. На основе последней зависимости можно оценивать характерное время реализации трёх фаз динамики не только площади пожара, но и его энергетических характеристик в терминах теплоизлучения.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания № FWES-2024-0027 Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН). Материалы спутникового мониторинга получены и обработаны в Центре коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

Литература

1. *Барталев С. А., Стыценко Ф. В.* Спутниковая оценка гибели древостоев от пожаров по данным о сезонном распределении пройденной огнем площади // *Лесоведение*. 2021. № 2. С. 115–122. DOI: 10.31857/S0024114821020029.
2. *Забродин А. Н., Пономарев Е. И.* Оценка связи между степенью пожарного воздействия на растительность и мощностью теплоизлучения от пожара // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 5. С. 166–175. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-166-175.
3. *Лулян Е. А., Стыценко Ф. В., Сенько К. С. и др.* Оценка площадей пожаров на основе детектирования активного горения с использованием данных шестой коллекции приборов MODIS // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18. № 4. С. 178–192. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192.
4. *Лулян 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.
5. *Пономарев Е. И., Швецов Е. Г.* Спутниковое детектирование лесных пожаров и геоинформационные методы калибровки результатов // *Исслед. Земли из космоса*. 2015. № 1. С. 84–91. DOI: 10.7868/S0205961415010054.
6. *Пономарев Е. И., Харук В. И., Якимов Н. Д.* (2017а) Результаты и перспективы спутникового мониторинга природных пожаров Сибири // *Сибирский лесной журн*. 2017. № 5. С. 25–36. DOI: 10.15372/SJFS20170503.
7. *Пономарев Е. И., Швецов Е. Г., Усатая Ю. О.* (2017б) Регистрация энергетических характеристик пожаров в лесах Сибири дистанционными средствами // *Исслед. Земли из космоса*. 2017. № 4. С. 3–11. DOI: 10.7868/S0205961417040017.
8. *Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г.* Климатические изменения и лесные пожары в России // *Лесоведение*. 2013. № 5. С. 50–61.
9. *Freeborn P. H., Wooster M. J., Roy D. P., Cochrane M. A.* Quantification of MODIS fire radiative power (FRP) measurement uncertainty for use in satellite-based active fire characterization and biomass burning estimation // *Geophysical Research Letters*. 2014. V. 41. Iss. 6. P. 1988–1994. DOI: 10.1002/2013GL059086.
10. *Giglio L., Schroeder W., Justice C.* 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.
11. *Hawkins D.* Biomeasurement: A Student's Guide to Biological Statistics, 3rd ed. Oxford, UK; N. Y., USA: Oxford University Press, 2014. 333 p.
12. *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. P. 1–8. DOI: 10.1088/1748-9326/9/10/105007.
13. *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*. 2011. V. 116. Iss. D19. P. 1–18. DOI: 10.1029/2011JD015676.
14. *Ponomarev E. I., Kharuk V. I., Ranson J. K.* Wildfires Dynamics in Siberian Larch Forests // *Forests*. 2016. No. 7. Article 125. P. 1–9. DOI: 10.3390/f7060125.

15. Ponomarev E. I., Masyagina O. V., Litvintsev K. Y. et al. The effect of post-fire disturbances on a seasonally thawed layer in the permafrost larch forests of Central Siberia // *Forests*. 2020. V. 11. Iss. 8. Article 790. DOI: 10.3390/f11080790.
16. 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. Iss. 1. Article 19. DOI: 10.3390/fire5010019.
17. 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.
18. 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. Iss. D24. DOI: 10.1029/2005JD006318.

Variability of fire radiative power under the conditions of burning in larch forests of Siberia

A. N. Zabrodin, E. I. Ponomarev

Krasnoyarsk Science Center SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia

E-mails: azabrodin@ksc.krasn.ru, evg@ksc.krasn.ru

Siberian Federal University, Krasnoyarsk 660041, Russia

The variability of heat emission from fires in Siberian larch stands (within the boundaries of 60–65° N, 100–130° E) was studied. We used the sample of 7 largest wildfires with a total area of 10,000 km² recorded in 2018, 2020 and 2021. For comparison, we analyzed a selection of wildfires recorded in 2015–2021 (29 fires, on a total area of up to 18,000 km²) with reference to other predominant variants of vegetation in Siberia: spars larch, stands of pine, spruce, Siberian pine (cedar), as well as tundra vegetation and Cedar elfin wood (*Pinus pumila*). We operated with the data on radiation power from active burning zones, calculated using the Fire Radiative Power (FRP) method and standard MODIS products. It is pointed out that the relative burn area of larch stands ($\gamma = 0.69\%$) exceeds by at least 2 times the same characteristic of other variants of vegetation in Siberia. It is shown that quasi-normal distribution of FRP values is typical for all large-scale fires (with area $\gg 20$ km²) of Siberia, including fires in larch forests. FRP from fires in larch forests can range from 12,000 MW to $>260,000$ MW. At the same time, the sporadic extremes of integral FRP (FRP_{int}) are an order of magnitude higher than the values corresponding to other variants of vegetation. The average FRP per a pixel of MODIS for fires in larch forests are 15% higher than the ones for pine stands and 25–35% higher than the typical values for fires in dark coniferous forests. The relation of FRP_{int} with the area of active combustion is approximated by a linear function with a confidence of at least 0.6 ($p < 0.05$). At the same time, the value of FRP_{int} aggregated over the entire period of fire development depends logarithmically on the final burned area. Based on the dependence, it is possible to estimate the characteristic realization time of the three phases of wildfire dynamics not only in terms of burned area, but also using energy characteristics in terms of heat emission.

Keywords: forest fires, larch forests, radiation power, FRP, integral fire radiative power from wildfire, Siberia

Accepted: 07.03.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-166-176

References

1. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., An Assessment of the Forest Stands Destruction by Fires Based on the Remote Sensing Data on a Seasonal Distribution of Burnt Areas, *Russian J. Forest Science (Lesovedenie)*, 2021, No. 2, pp. 115–122 (in Russian), DOI: 10.31857/S0024114821020029.
2. Zabrodin A. N., Ponomarev E. I., Dependence assessment between the degree of fire impact on vegetation and the fire radiative power, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 5, pp. 166–175 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-166-175.

3. Loupian E. A., Stytsenko F. V., Senko K. S. et al., Burnt area assessment using MODIS collection 6 active fire data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 178–192 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192.
4. 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.
5. Ponomarev E. I., Shvetsov E. G., Satellite Detection of Forest Fires and Geoinformation Methods for Calibrating of the Result, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 1, pp. 84–91 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961415010054.
6. Ponomarev E. I., Kharuk V. I., Yakimov N. D., Current results and perspectives of wildfire satellite monitoring in Siberia, *Siberian J. Forest Science*, 2017, No. 5, pp. 25–36 (in Russian), DOI: 10.15372/SJFS20170503.
7. Ponomarev E. I., Shvetsov E. G., Usataya Yu. O., Determination of the Energy Properties of Wildfires in Siberia by Remote Sensing, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018, Vol. 54, No. 9, pp. 979–985, DOI: 10.1134/S000143381809030X.
8. Shvidenko A. Z., Schepaschenko D. G., Climate change and wildfires in Russia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2013, Vol. 6, No. 7, pp. 683–692.
9. Freeborn P. H., Wooster M. J., Roy D. P., Cochrane M. A., Quantification of MODIS fire radiative power (FRP) measurement uncertainty for use in satellite-based active fire characterization and biomass burning estimation, *Geophysical Research Letters*, 2014, Vol. 41, Issue 6, pp. 1988–1994, DOI: 10.1002/2013GL059086.
10. Giglio L., Schroeder W., Justice C., The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 178, pp. 31–41, DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.054.
11. Hawkins D., *Biomeasurement: A Student's Guide to Biological Statistics*, 3rd ed., Oxford, UK; New York, USA: Oxford University Press, 2014, 333 p.
12. 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, pp. 1–8, DOI: 10.1088/1748-9326/9/10/105007.
13. 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*, 2011, Vol. 116, Issue D19, pp. 1–18, DOI: 10.1029/2011JD015676.
14. Ponomarev E. I., Kharuk V. I., Ranson J. K., Wildfires Dynamics in Siberian Larch Forests, *Forests*, 2016, No 7, Article 125, pp. 1–9, DOI: 10.3390/f7060125.
15. Ponomarev E. I., Masyagina O. V., Litvintsev K. Y. et al., The effect of post-fire disturbances on a seasonally thawed layer in the permafrost larch forests of Central Siberia, *Forests*, 2020, Vol. 11, Issue 8, Article 790, DOI: 10.3390/f11080790.
16. Ponomarev E., Zabrodin A., Ponomareva T., Classification of Fire Damage to Boreal Forests of Siberia in 2021 Based on the dNBR Index, *Fire*, 2022, Vol. 5, Issue 1, Article 19, DOI: 10.3390/fire5010019.
17. 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.
18. 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, DOI: 10.1029/2005JD006318.