

## Оценка послепожарной гибели лесов в Сибири по спутниковым данным и ее связь с характеристиками пожаров

Е. Г. ШВЕЦОВ

Федеральный исследовательский центр “Красноярский научный центр Сибирского отделения РАН” (ФИЦ КНЦ СО РАН)  
660036, Красноярск, Академгородок, 50  
E-mail: eugeneshvetsov11@yandex.ru

Статья поступила 15.12.2023

После доработки 29.01.2024

Принята к печати 12.02.2024

### Аннотация

В работе рассматривается влияние энергетических характеристик пожаров, их сезонности и продолжительности на количество пожаров, приводящих к гибели древостоев, на территории Сибири за 2002–2022 гг. Энергетические характеристики пожаров оцениваются с помощью такого показателя, как мощность теплоизлучения пожаров (Fire Radiative Power, FRP), измеряемого по данным радиометра MODIS. Для оценки степени нарушенности древостоев и выделения тех пожаров, которые приводили к гибели древостоя, использовался продукт изменения глобального лесного покрова, сформированный по данным спутников Landsat. За период 2002–2022 гг. в регионе наблюдался рост как общей площади, пройденной огнем, так и площади пожаров, сопровождавшихся гибелю древостоя. Одновременно наблюдался и рост регистрируемой мощности теплоизлучения пожаров. При этом суммарные значения мощности теплоизлучения, выделенной в течение времени действия пожара, в случае пожаров, приводивших к гибели древостоев ( $390,2 (\sigma = 80,5)$  МВт/км<sup>2</sup>), оказались значимо выше ( $p < 0,01$ ) значений мощности теплоизлучения для пожаров, не приводивших к гибели древостоев ( $291,8 (\sigma = 74,7)$  МВт/км<sup>2</sup>). Мощность теплоизлучения пожаров в темнохвойных лесах и лиственничниках была в среднем на 20–25 % выше, чем для пожаров в смешанных лесах с преобладанием лиственных древостоев. Пожары, сопровождавшиеся гибелю лесов, обычно регистрировались во второй половине лета с максимумом, приходящимся на июль – первую декаду августа, в то время как пожары, не приводившие к гибели древостоя, наблюдались в течение всего пожароопасного сезона. Также породосменные пожары характеризовались большей длительностью (средняя продолжительность 4,8 ( $\sigma = 1,0$ ) дня) по сравнению с непородосменными (3,9 ( $\sigma = 0,7$ ) дня).

**Ключевые слова:** пожары растительности, степень повреждения лесов, мощность теплоизлучения пожара, FRP, MODIS, Сибирь.

### ВВЕДЕНИЕ

Лесные пожары являются одним из наиболее значимых факторов, влияющих на динамику растительности, биоразнообразие и углеродный цикл в лесах России [Барталев и др., 2015; Leskinen et al., 2020]. Ин-

формация о степени воздействия пожаров на растительность представляет значительный интерес в контексте глобальных эмиссий углерода и вероятных климатических изменений [Bowman et al., 2009; Швиденко и др., 2011]. Воздействие пожаров на леса опреде-

ляется рядом факторов, включая вид и интенсивность пожара, породный состав и возрастную структуру древостоев, почвенные и другие условия. Пожары могут приводить как к стимуляции естественного возобновления в лесах, так и к полной гибели древостоев и трансформации лесных экосистем в степные [Kukavskaya et al., 2016]. Так, в лиственничных лесах севера Сибири пожары способствуют естественному возобновлению древостоя [Kharuk et al., 2023]. В то же время высокointенсивные или повторяющиеся пожары приводят к гибели древостоя в южных районах Сибири [Kukavskaya et al., 2016; Shvetsov et al., 2019]. Например, лиственничные леса Сибири характеризуются значительной долей высокointенсивных пожаров, приводящих к гибели древостоя [Krylov et al., 2014; Ponomarev et al., 2023]. При этом степень пирогенного повреждения лесов является значимым фактором, влияющим на послепожарную динамику лесов [Shvetsov et al., 2019]. Темнохвойные леса, произрастающие в условиях повышенной влажности, обычно характеризуются низкой горимостью, однако в условиях длительной засухи могут подвергаться воздействию верховых пожаров, приводящих к гибели древостоев на значительных площадях [Kharuk et al., 2021]. При этом в течение последних 15 лет на территории России наблюдался рост числа пожаров, приводящих к гибели древостоя [Барталев, Стыщенко, 2021].

Применение спутниковых средств мониторинга позволяет лучше оценивать исторические и текущие факторы, такие как пожары растительности, влияющие на динамику лесов и изменения растительного покрова [Барталев и др., 2015]. Спутниковые данные дают возможность не только обнаруживать очаги пожаров, но и оценивать количество энергии, выделяемой в процессе горения биомассы, а также интенсивность кромки пожара и скорость сгорания биомассы [Wooster, 2002; Wooster, Zhang, 2004]. Данные о мощности теплоизлучения пожаров (Fire Radiative Power, FRP) используются для детектирования очагов верхового горения, анализа зависимости интенсивности горения от погодных условий на территории Сибири [Швецов, Пономарев, 2015; Пономарев и др., 2017] и оценки степени повреждения лесов пожарами [Лупян и др., 2022].

Спутниковые средства также широко используются в задачах оценки послепожарного состояния лесов. Отмечалось, что нормализованный индекс гарей (NBR) достаточно хорошо коррелирует со степенью пирогенной нарушенности растительности [Барталев и др., 2010; Delcourt et al., 2021; Швецов 2022]. Карта изменения глобального лесного покрова, сформированная по данным спутников Landsat [Hansen et al., 2013] и включающая набор слоев, которые содержат информацию о месте и времени гибели лесов, также может применяться для анализа последствий пожаров и степени пирогенной нарушенности [Krylov et al., 2014; Shvetsov et al., 2021].

В данной работе рассматривается связь интенсивности горения, оцененной через мощность теплоизлучения пожара, и степени повреждения лесов, выраженной через долю погибших древостоев. Задачи исследования включали: 1) анализ динамики мощности теплоизлучения пожаров и доли пожаров, приводивших к гибели древостоев, на территории Сибири; 2) оценку зависимости мощности теплоизлучения лесных пожаров от преобладающих древесных пород; 2) анализ связи между мощностью теплоизлучения, а также сезонностью и продолжительностью пожаров и долей породосменных пожаров.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования выполнены для территории Сибири в границах примерно  $50-75^{\circ}$  с. ш. и  $60-160^{\circ}$  в. д., общей площадью около  $9,5 \cdot 10^6$  км<sup>2</sup> (рис. 1). Согласно использованной в работе карте растительности, доступной через сервис Vega (ИКИ РАН, Москва, <http://pro-vega.ru/maps/>) [Барталев и др., 2016], преобладающими лесообразующими породами являются лиственница (*Larix sibirica*, *L. gmelini*) – около 55 % лесной площади района исследования, темнохвойные породы: кедр (*Pinus sibirica*), пихта (*Abies sibirica*) ель (*Picea obovata*) – около 13 % площади, сосна (*Pinus sylvestris*) – 14 %. Существенная часть площади лесов (18 %) приходится на смешанные леса с преобладанием лиственных пород (*Betula spp.*, *Populus tremula*).

Для выполнения работы использовались архивы тематических продуктов MODIS за 2002–2022 гг. Загрузка данных выполнялась

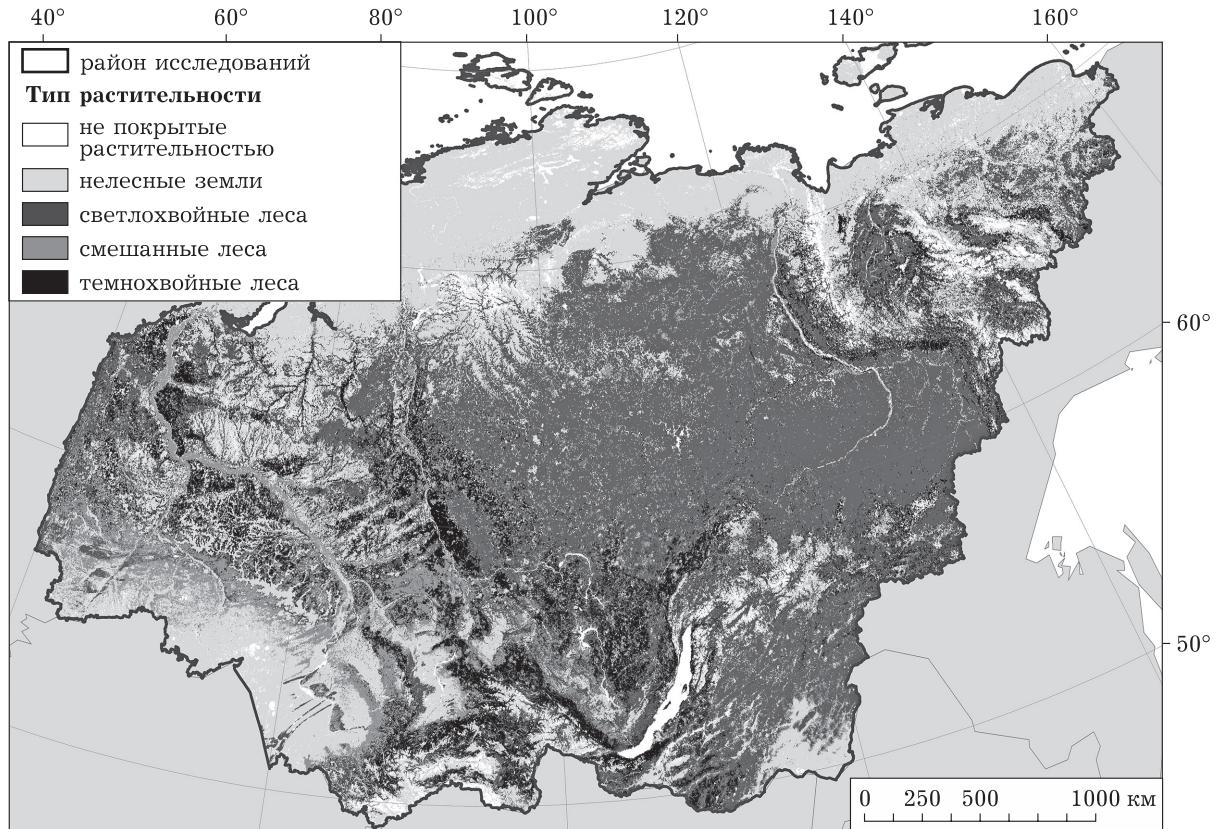


Рис. 1. Район исследований. Преобладающие типы древостоя на территории района исследования показаны согласно карте растительности ИКИ РАН

с помощью сервиса LAADS (Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System, <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>). Использовались следующие продукты: продукт гарей (MCD64A1, пространственное разрешение 500 м) [Giglio et al., 2016]; продукт тепловых аномалий (MOD14, пространственное разрешение 1000 м), содержащий оценки мощности теплоизлучения пожара (FRP) [Giglio et al., 2020].

Для детектирования участков, где имела место гибель лесного покрова, использовался глобальный продукт изменения лесного покрова [Hansen et al., 2013] версии 1.10, находящийся в открытом доступе (<https://glad.earthengine.app/view/global-forest-change>). Продукт сформирован по данным спутниковых систем Landsat-7 и -8 среднего пространственного разрешения (30 м) и включает базовый слой лесов по состоянию на 2000 г., а также динамические слои изменений (появление или исчезновение) лесного покрова с периодичностью один год с 2001 по 2022 г.

Из продукта тепловых аномалий была сформирована выборка пожарных пикселей, пространственное расположение которых соответствовало положению гарей, определенных по данным продукта гарей MODIS. Такие выборки были сформированы за каждый год в период с 2002 по 2022 г. С помощью карты преобладающих лесообразующих пород [Барталев и др., 2016] выполнялась привязка полученных пожарных пикселей к основным лесообразующим породам района исследования.

С использованием указанных наборов данных был определен набор переменных в формате растровых слоев, использованных для дальнейшего анализа. Во-первых, это переменные, содержащие характеристики пожара, а именно: среднее значение мощности теплоизлучения пожара, максимальное значение мощности теплоизлучения, а также общее значение мощности теплоизлучения, рассчитанное как сумма значений FRP для всех пикселей тепловых аномалий, совпадающих с данным пиксели гарей. При этом значение

мощности теплоизлучения, которое приводится в продукте тепловых аномалий, нормировалось на фактическую площадь пикселя [Ichoku, Kaufman, 2005], что позволило получить мощность теплоизлучения с единицы площади. Также была рассчитана продолжительность пожара (как разность между датами первого и последнего наблюдения пожара в данном пикселе).

Далее, для каждого пожарного пикселя MODIS по данным продукта изменения лесного покрова [Hansen et al., 2013] рассчитывался процент площади, на которой имела место гибель древостоя, т. е. доля породосменных пожаров. Данный показатель вычислялся как доля пикселей продукта изменения лесного покрова (пространственное разрешение 30 м), в которых произошла гибель древостоя, относительно общего числа пикселей этого продукта в пределах одного пикселя пожарного продукта MODIS (пространственное разрешение около 500 м). Поскольку вызванная пожарами гибель древостоя может наблюдаться в течение нескольких лет после пирогенного воздействия, использовалось пороговое значение в 3 года согласно подходу, примененному ранее для выделения нарушенностей, связанных с воздействием лесных пожаров [Krylov et al., 2014]. То есть гибель древостоя в рассматриваемом пикселе считалась вызванной пожаром, если она имела место не позднее трех лет после пирогенного воздействия. При этом если доля пикселя выходного раstra, на которой фиксировалась гибель древостоя, превышала 50 %, то весь такой пожарный пиксель относился к классу "породосменных пожаров".

Таким образом, для каждого пожарного пикселя была получена следующая информация: среднее и максимальное значения мощности теплоизлучения (FRP), а также общее значение, рассчитанное как сумма всех значений FRP в течение года; длительность пирогенного воздействия (разность между датами первого и последнего наблюдения пожара); доля площади лесов, погибших в результате пожара; преобладающие древесные породы.

Используя полученные данные, была определена динамика площади породосменных и непородосменных пожаров на территории Сибири, а также динамика средней мощности теплоизлучения пожаров. Также были рассчитаны площади пожаров и зна-

чения мощности теплоизлучения по данным за все годы рассмотренного периода в разрезе преобладающих типов древостоев. Для анализа значимости различий таких параметров, как мощность теплоизлучения, дата начала и продолжительность пожара между классами породосменных и непородосменных пожаров, использовался критерий Манна – Уитни. Доля породосменных пожаров рассчитывалась как отношение числа пожарных пикселей, классифицированных как пожары, приводившие к гибели древостоя, к общему числу пожарных пикселей, умноженное на 100 %.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

С использованием продукта изменения лесного покрова обнаруженные пожары были разделены на классы породосменных и непородосменных. Динамика площадей этих двух классов пожаров показана на рис. 2, а.

Начиная с 2012 г. наблюдался значимый рост как общей площади, пройденной огнем, так и площади пожаров, сопровождавшихся гибелю древостоев в регионе. Так, в первой половине рассмотренного периода (2002–2011 гг.) средняя площадь лесных пожаров составила 4,6 млн га в год ( $\sigma = 3,1$ ) (здесь и далее по тексту  $\sigma$  обозначает стандартное отклонение), а площадь пожаров, приводивших к гибели лесов, – 1,2 млн га в год. ( $\sigma = 0,9$ ). В то же время во второй половине периода (2012–2022 гг.) площади выросли до 8,4 ( $\sigma = 3,4$ ) и 4,5 ( $\sigma = 2,2$ ) млн га в год соответственно. В целом можно отметить, что хотя тренд увеличения общей площади, пройденной огнем, в регионе не являлся статистически значимым ( $r^2 = 0,18$ ;  $p = 0,06$ ), наличие значимого тренда было отмечено для площади пожаров, приводивших к гибели древостоев ( $r^2 = 0,37$ ;  $p < 0,01$ ).

Наибольшая доля пожаров, приводивших к гибели древостоев, отмечалась в случае пожаров в лесах с преобладанием темнохвойных древостоев – 61 % (рис. 2, б). Доля таких пожаров в светлохвойных насаждениях была ниже и составляла 52 % для лесов с преобладанием лиственницы и около 40 % в случае сосновых насаждений. Наконец, смешанные леса характеризовались наименьшей долей породосменных пожаров – около 6 %. Средняя доля

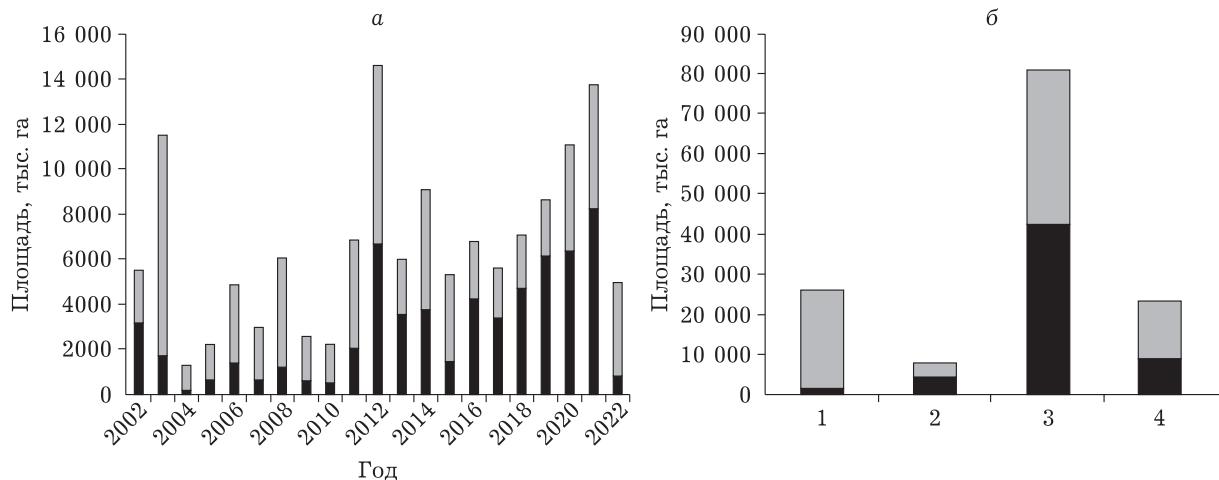


Рис. 2. Динамика площади пожаров на территории Сибири за период 2002–2022 (а); темным цветом показаны площади пожаров, классифицированных как породосменные, светлым – как непородосменные. Площади породосменных и непородосменных пожаров для основных преобладающих типов древостоев (б): 1 – смешанные древостои, 2 – с преобладанием темнохвойных пород, 3 – с преобладанием лиственницы, 4 – с преобладанием сосны

пожаров этого класса во всех преобладающих типах древостоев составила около 42 %.

На рис. 3 показаны средние значения мощности теплоизлучения пожаров, а также ее динамика за период с 2002 по 2022 г. для основных преобладающих типов древостоев. Для последних наблюдался тренд увеличения средних значений мощности теплоизлучения за рассмотренный период. Так, статистически значимый линейный тренд выявлен для темнохвойных древостоев ( $r^2 = 0,6$ ;  $p < 0,01$ ), древостоев с преобладанием лиственницы

( $r^2 = 0,5$ ;  $p < 0,01$ ) и сосны ( $r^2 = 0,4$ ;  $p < 0,05$ ). Исключением стали смешанные древостои, для которых не было обнаружено значимого тренда ( $r^2 = 0,1$ ;  $p = 0,21$ ).

Можно отметить, что вторая половина рассмотренного периода характеризовалась более высокими средними значениями мощности теплоизлучения пожаров по сравнению с первой половиной периода. Так, в случае лиственничных древостоев средняя мощность теплоизлучения пожаров в период 2012–2022 гг. составила 38,2 МВт/км<sup>2</sup> ( $\sigma = 7,8$ ), что пример-

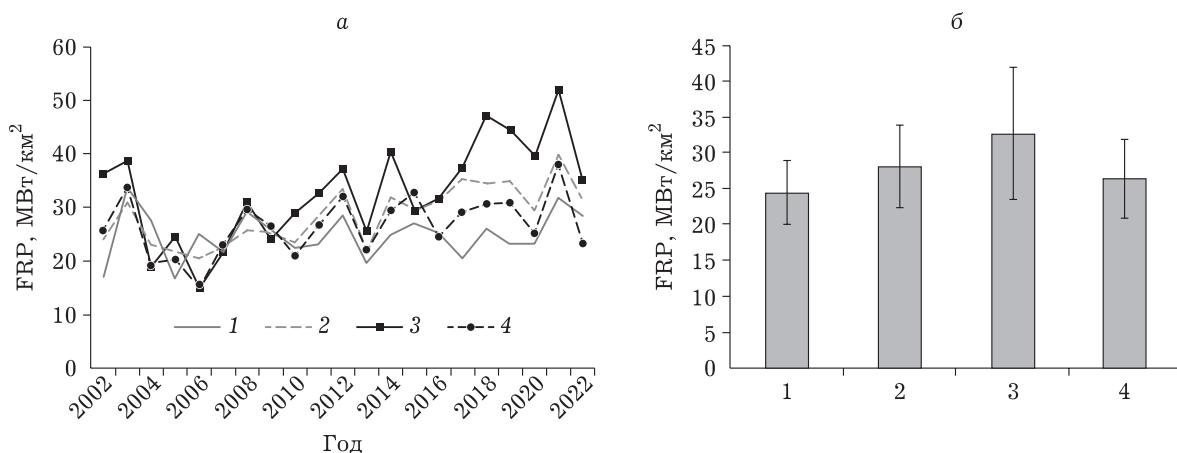


Рис. 3. Динамика средних значений мощности теплоизлучения пожара для основных преобладающих типов древостоев с 2002 по 2022 г. (а). Средние значения мощности теплоизлучения пожара для основных преобладающих типов древостоев (б). Планки погрешности соответствуют одному стандартному отклонению. 1 – смешанные древостои; 2 – древостои с преобладанием темнохвойных пород, 3 – древостои с преобладанием лиственницы, 4 – древостои с преобладанием сосны

но на 40 % выше средней мощности за 2002–2011 гг. – 27,2 МВт/км<sup>2</sup> ( $\sigma = 7,7$ ). Также более высокие значения средней мощности теплоизлучения во второй половине рассмотренного периода наблюдались для темнохвойных лесов (32,2 МВт/км<sup>2</sup> ( $\sigma = 4,6$ ) / 24,6 МВт/км<sup>2</sup> ( $\sigma = 3,2$ )) и лесов с преобладанием сосновых древостоев (29,0 МВт/км<sup>2</sup> ( $\sigma = 4,8$ ) / 24,1 МВт/км<sup>2</sup> ( $\sigma = 5,5$ )).

Пожары, действовавшие в лесах с преобладанием лиственничных и темнохвойных древостоев, характеризовались более высокими значениями мощности теплоизлучения (32,7 МВт/км<sup>2</sup> ( $\sigma = 9,2$ ) и 28,1 МВт/км<sup>2</sup> ( $\sigma = 5,8$ )) по сравнению с мощностью теплоизлучения пожаров в лесах с доминированием сосновых насаждений (26,4 МВт/км<sup>2</sup> ( $\sigma = 5,6$ )) и в смешанных лесах (24,5 МВт/км<sup>2</sup> ( $\sigma = 4,4$ )) (рис. 3, б).

На рис. 4 показаны диаграммы значений мощности теплоизлучения для породосменных и непородосменных пожаров. В случае пожаров, приводивших к гибели древостоев, средние значения мощности теплоизлучения различались примерно на 14 %: 30 МВт/км<sup>2</sup> ( $\sigma = 5,6$ ) в случае пожаров, приводивших к гибели древостоев, и 26,4 МВт/км<sup>2</sup> ( $\sigma = 5,6$ ) – для остальных пожаров (рис. 4, а). При этом разница между двумя классами не являлась статистически значимой с точки зрения критерия Манна – Уитни ( $p = 0,06$ ).

Статистически значимой ( $p < 0,01$ ) разница оказалась при рассмотрении общих (сум-

марных) значений мощности теплоизлучения (рис. 4, б). Так, в случае породосменных пожаров суммарное значение мощности теплоизлучения, усредненное за период с 2002 по 2022 г., составило 390,2 МВт/км<sup>2</sup> ( $\sigma = \pm 80,5$ ), а в случае непородосменных пожаров – 291,8 МВт/км<sup>2</sup> ( $\sigma = 74,7$ ).

Пожары, не приводившие к гибели древостоя, наблюдались в течение всего пожароопасного сезона. При этом пожары, сопровождавшиеся гибелю лесов, обычно регистрировались во второй половине лета (рис. 5, а). Так, в среднем дата начала пожаров, не приводивших к гибели древостоя, соответствовала 186-му ( $\sigma = 17$ ) дню года. В то же время в случае пожаров, сопровождавшихся гибелю лесов, дата первого обнаружения статистически значимо ( $p < 0,01$ ) отличалась и соответствовала 204-му ( $\sigma = 10$ ) дню года.

При этом пожары, приводившие к гибели древостоев, также характеризовались большей длительностью, т. е. временем воздействия на растительность, по сравнению с пожарами, не приводящими к гибели древостоя (рис. 5, б). Так, в случае пожаров, не приводивших к гибели древостоя, средняя продолжительность наблюдения пожара в пределах пикселя составила 3,8 ( $\sigma = 0,7$ ) дня, что статистически значимо ( $p < 0,01$ ) отличалось от продолжительности породосменных пожаров, для которых эта величина соответствовала 4,9 ( $\sigma = 1,0$ ) дня.

Величина мощности теплоизлучения пожара имела достаточно высокую корреля-

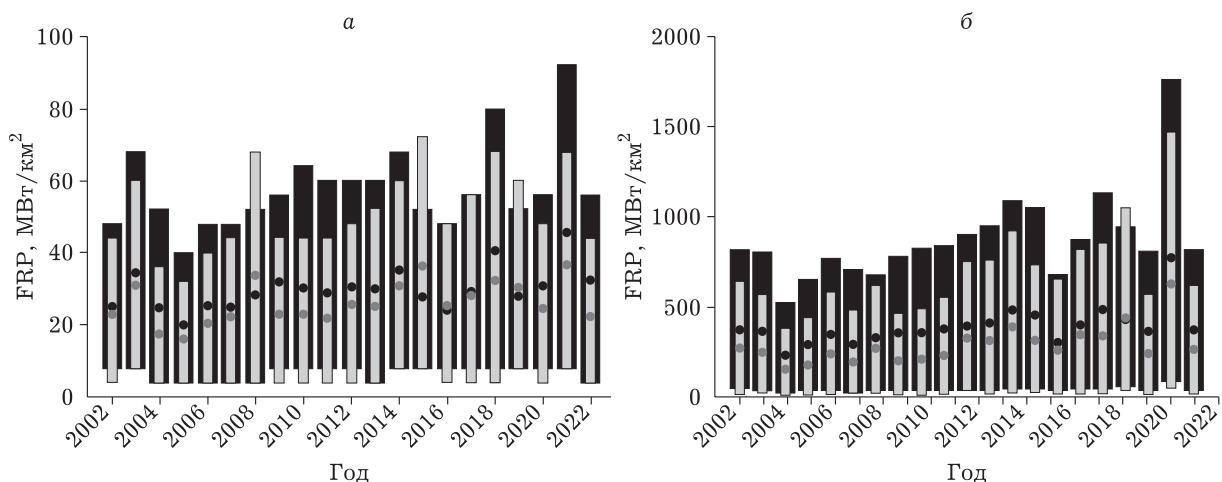


Рис. 4. Средние (а) и суммарные (б) значения мощности теплоизлучения для пожарных пикселей. Темно-серый цвет – породосменные пожары, светло-серый – непородосменные. Точки соответствуют средним значениям за каждый год, а столбцы – интервалам с 10-го по 90-й процентили

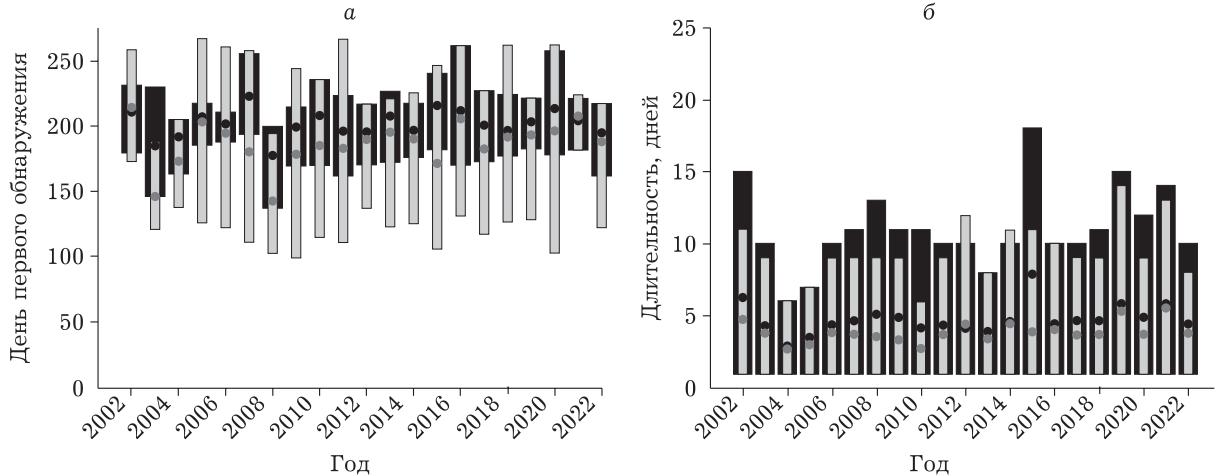


Рис. 5. Номер дня первого обнаружения пожара (а) и длительность пожаров в днях (б). Темно-серый цвет – породосменные пожары, светло-серый – непородосменные. Точки соответствуют средним значениям за каждый год, столбцы – интервалам с 10-го по 90-й процентили

цию с величиной послепожарной гибели древостоя для всех преобладающих типов лесов. Так, зависимость доли породосменных пожаров от мощности теплоизлучения пожара может быть хорошо описана с помощью линейной регрессии (рис. 6, а). Зависимость между этими двумя величинами имела вид  $P(FRP) = 0,05FRP + 27,4$  ( $r^2 = 0,88$ ,  $p < 0,01$ ), где  $P$  – доля породосменных пожаров.

Анализ сезонной динамики породосменных пожаров демонстрирует быстрый рост их доли в течение июня (с 20 до 50 %) с достижением максимальных значений (на уровне 50–60 %) и последующим снижением их доли в течение августа и сентября (рис. 6, б). Динамика изменения доли пожаров, приводящих к гибели древостоя, в течение сезона хорошо описывалась логистической функцией вида

$$P(t) = 2,8 + 55 \left( \frac{1}{1 + \exp(-0,12(t - 159,2))} + \frac{1}{1 + \exp(0,06(t - 260,4))} - 1 \right),$$

где  $P$  – доля породосменных пожаров ( $r^2 = 0,9$ ;  $p < 0,01$ ) (см. рис. 6, б). К концу сентября доля пикселей, соответствующих таким пожарам, резко снижалась практически до нуля.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что в течение периода с 2002 по 2022 г. на террито-

рии Сибири наблюдался не только рост площади, пройденной огнем [Kharuk et al., 2021, 2023], но также и значимый рост площади пожаров, сопровождавшихся гибелю древостоя (см. рис. 2, а). Так, доля пожаров, приводивших к гибели древостоя, в общей площади, пройденной огнем, с 2002 по 2022 г. составила около 42 %. При этом в первой половине рассмотренного периода (2002–2011 гг.) данный показатель составил около 29 %. Схожая оценка доли породосменных пожаров (33,6 %) за период с 2002 по 2011 г. опубликована ранее для всей территории России [Krylov et al., 2014]. Также можно отметить, что низкая доля пожаров, приводивших к гибели древостоя, в 2022 г. (около 14 %, см. рис. 2, а) связана с отсутствием данных по гибели древостоя в используемом продукте изменения лесного покрова. Таким образом, по мере обновления данных этот показатель, вероятно, возрастет.

Наибольшая доля пожаров, приводивших к гибели древостоя, отмечена в лесах с преобладанием темнохвойных пород (более 60 %), при этом на леса этого типа приходилось менее 6 % общей площади, пройденной огнем. Пожары в лесах такого типа возникают сравнительно редко по причине их произрастания в районах с высоким уровнем влажности, однако в засушливые периоды в таких лесах могут возникать верховые пожары, приводящие к гибели лесов на больших площадях [Kharuk et al., 2021]. Большая часть площади, пройденной огнем, на территории Сибири (более 60 %)

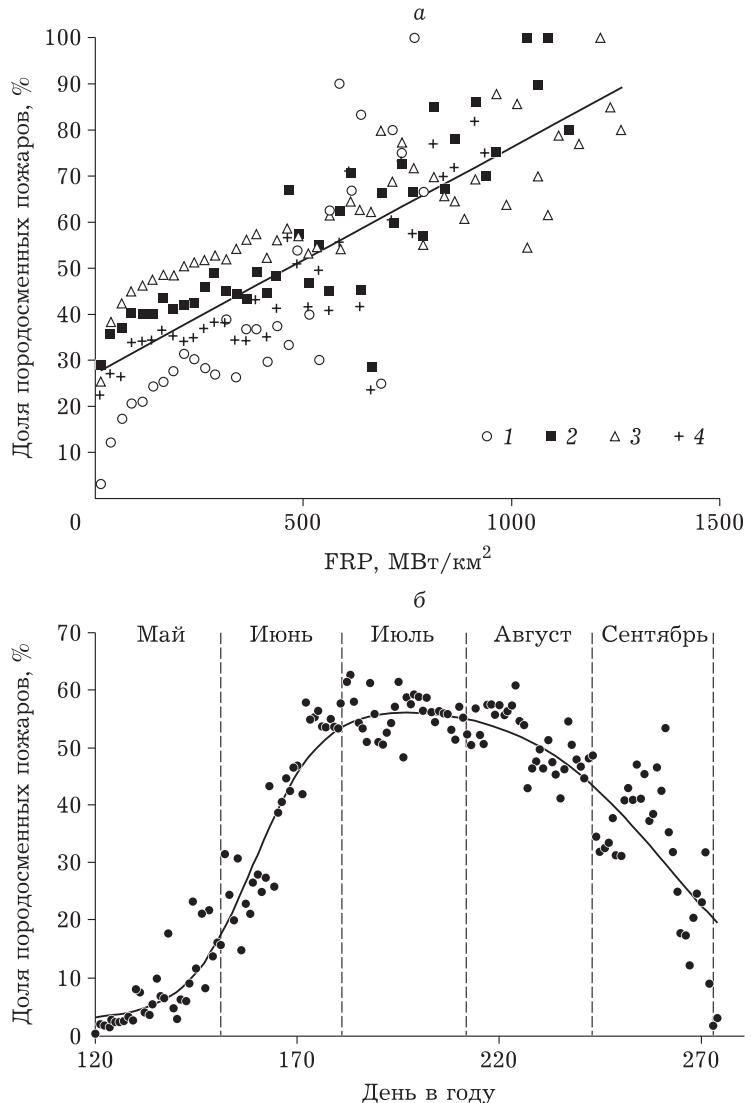


Рис. 6. Доля породосменных пожаров в зависимости от: а – мощности теплоизлучения пожара; б – даты начала пожара. 1 – пожары в смешанных древостоях; 2 – пожары в древостоях с преобладанием темнохвойных пород; 3 – пожары в древостоях с преобладанием лиственницы; 4 – пожары в древостоях с преобладанием сосны. Рисунок б построен по данным для всех типов преобладающих древостоев

приходится на лиственничные леса; в отдельные годы этот показатель может достигать 75 %. При этом гибель древостоя наблюдалась на более чем 50 % площади, пройденной огнем, в лесах этого типа. Хотя в лиственничных лесах преобладают низовые пожары относительно невысокой интенсивности [Sofronov et al., 2000], устойчивые летние пожары способны наносить значительные термические повреждения поверхностной корневой системе, приводя к гибели древостоя, особенно в северных лесах [Kharuk et al., 2021].

Рост доли пожаров, приводивших к гибели древостоев, в лесах Сибири на протяжении

последнего десятилетия сопровождается увеличением регистрируемой мощности теплоизлучения пожаров (см. рис. 3, а) и доли высокоинтенсивных пожаров [Пономарев et al., 2023]. Такой рост доли интенсивности может быть связан с большей засушливостью климата, а также с ростом числа пожаров, вызванных молниями [Kharuk et al., 2021]. При этом наибольшие значения радиационной мощности пожаров наблюдаются в лиственничных и темнохвойных древостоях. Схожие результаты ранее получены для территории Средней Сибири [Швецов, Пономарев, 2015] и Алтая–Саянского региона [Пономарев и др., 2015].

Анализ распределения мощности теплоизлучения для пожаров, относящихся к классам породосменных и непородосменных, показал, что разница в значениях FRP для этих классов является достаточно выраженной, особенно при рассмотрении суммарных величин мощности теплоизлучения (см. рис. 4). Для класса, соответствующего породосменным пожарам, величина радиационной мощности в среднем на 30–40 % выше, чем для класса породосменных пожаров. Еще более выраженными (35–45 %) оказываются различия при рассмотрении 90-го процентиля распределения мощности теплоизлучения. В целом это согласуется с ранее полученными результатами о существовании зависимости между интенсивностью горения и степенью пирогенного повреждения древостоев [Швецов, 2022; Ропомарев et al., 2023]. В то же время можно отметить, что даже пожары с низкими значениями мощности тепловыделения (менее 50 МВт/км<sup>2</sup>) могут приводить к гибели древостоев (см. рис. 6, а), что отмечалось ранее [Лупян и др., 2022]. Частично это может являться следствием условий наблюдения, когда сигнал от пожарных пикселей, находящихся на краю полосы обзора сенсора MODIS, существенно ослабляется и фактически сенсор регистрирует только небольшую часть теплового излучения.

Также можно отметить, что частота пожаров, приводящих к гибели древостоя, возрастает во второй половине пожароопасного сезона и достигает наибольших значений в июле и начале августа (см. рис. 5, а, б, б), когда горючие материалы подвергались воздействию засухи из-за устойчивых антициклонов. В таких условиях средняя радиационная мощность пожаров может возрастать на 8–10 % [Швецов, Пономарев, 2015]. Подобное распределение количества высокointенсивных пожаров во времени согласуется с приведенными в литературе характеристиками пожароопасных сезонов для территории Средней Сибири [Sukhinin et al., 2004; Валендик и др., 2014].

В данной работе анализ выполнялся для всей территории Сибири. При этом стоит отметить, что рассмотренная территория, учитывая ее большую площадь, характеризуется существенными вариациями климатических условий. Это, в свою очередь, приводит к тому, что в разных районах Сибири

периоды засух и связанные с ними периоды высокой пожарной активности не совпадают. Ранее было обнаружено, что в условиях засухи мощность тепловыделения пожаров возрастает для лесов как Сибири [Швецов, Пономарев, 2015], так и Северной Америки [Barrett, Kasischke, 2013]. Поэтому в случае отдельного рассмотрения регионов, в которых в условиях длительной засухи регистрировалось большое количество пожаров, значения мощности теплоизлучения и доля породосменных пожаров, вероятно, будут выше.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных спутникового мониторинга лесных пожаров на территории Сибири за период с 2002 по 2022 г. выполнен анализ площадей, пройденных породосменными пожарами, с учетом мощности теплоизлучения и длительности пожаров, сезонности, а также типов лесов, в которых наблюдались пожары. Так, в течение рассмотренного периода наблюдался как рост общей площади, пройденной огнем, так и значимый рост площади пожаров, сопровождавшихся гибелю древостоя. Вместе с этим отмечалось увеличение регистрируемой мощности теплоизлучения пожаров. В привязке к картам преобладающих древостоев установлено, что мощность теплоизлучения пожаров в темнохвойных лесах и лиственничниках в среднем на 20–25 % выше, чем в случае пожаров в смешанных лесах с преобладанием лиственных древостоев.

Породосменные пожары обычно регистрировались во второй половине лета с максимумом, приходящимся на июль – первую декаду августа, в то время как пожары, не приводившие к гибели древостоя, могли наблюдаться в течение всего пожароопасного сезона. Также пожары, приводившие к гибели лесов, характеризовались большим временем воздействия на растительность (средняя продолжительность 4,9 ( $\sigma = 1,0$ ) дня) по сравнению с непородосменными (3,8 ( $\sigma = 0,7$ ) дня).

Результаты работы показали, что доля пожаров, приводящих к гибели древостоя, на территории Сибири в значительной степени определяется величиной мощности теплоизлучения пожара, его продолжительностью, сезонностью, а также типом преобладающего древостоя.

## **Благодарности**

Автор выражает благодарность Федеральному исследовательскому центру “Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук”, а также рецензенту за ценные комментарии.

## **Финансирование**

Выполнение работы профинансирано в рамках госзадания FWES-2024-0027 (Федеральный исследовательский центр “Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук”).

## **Соблюдение этических стандартов**

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

## **Конфликт интересов**

Автор данной работы заявляет, что у него нет конфликта интересов.

## **ЛИТЕРАТУРА**

- Барталев С. А., Стыщенко Ф. В. Спутниковая оценка гибели древостоеов от пожаров по данным о сезонном распределении пройденной огнем площади // Лесоведение. 2021. № 2. С. 115–122.
- 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.
- Барталев С. А., Егоров В. А., Крылов А. М., Стыщенко Ф. В., Ховратович Т. С. Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 3. С. 215–225.
- Барталев С. А., Стыщенко Ф. В., Егоров В. А., Лупян Е. А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
- Валендинк Э. Н., Кисиляхов Е. К., Рыжкова В. А., Пономарев Е. И., Данилова И. В. Крупные пожары в таежных ландшафтах Центральной Сибири // География и природ. ресурсы. 2014. № 1. С. 52–59.
- Лупян Е. А., Лозин Д. В., Балашов И. В., Барталев С. А., Стыщенко Ф. В. Исследование зависимости степени повреждений лесов пожарами от интенсивности горения по данным спутникового мониторинга // Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19, № 3. С. 217–232.
- Пономарев Е. И., Швецов Е. Г., Усатая Ю. О. Регистрация энергетических характеристик пожаров в лесах Сибири дистанционными средствами // Исследование Земли из космоса. 2017. № 4. С. 3–11.
- Пономарев Е. И., Швецов Е. Г., Харук В. И. Пожары в Алтас-Саянском регионе: ландшафтно-экологическая приуроченность // Геофиз. процессы и биосфера. 2015. № 4. С. 5–21 [Ponomarev E. I., Shvetsov E. G., Kharuk V. I. Fires in the Altai-Sayan Region: Landscape and Ecological Confinement // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. Vol. 52, N 7. P. 725–736. <https://doi.org/10.1134/S0001433816070069>].
- Швецов Е. Г. Исследование влияния мощности теплоизлучения лесных пожаров на степень повреждения лесов на территории юга Средней Сибири по спутниковым данным // Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19, № 5. С. 136–146. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-5-136-146>
- Швецов Е. Г., Пономарев Е. И. Оценка влияния внешних условий на мощность теплоизлучения от лесных пожаров по данным спутникового мониторинга // Сиб. экол. журн. 2015. Т. 22, № 3. С. 413–421. [Shvetsov E. G., Ponomarev E. I. Estimating the influence of external environmental factors on fire radiative power using satellite imagery // Contemporary Problems of Ecology. 2015. Vol. 8, N 3. P. 337–343. <https://doi.org/10.1134/S1995425515030142>].
- Швиденко А. З., Щепащенко Д. Г., Ваганов Е. А., Сухинин А. И., Максютов Ш. Ш., МакКаллум И., Лакида И. П. Влияние природных пожаров в России 1998–2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет // Докл. АН. 2011. Т. 411, № 4. С. 544–548.
- Barrett K., Kasischke E. S. Controls on variations in MODIS fire radiative power in Alaskan boreal forests: Implications for fire severity conditions // Remote Sensing of Environment. 2013. Vol. 130. P. 171–181. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.11.017>
- Bowman D. M. J. S., Balch J. K., Artaxo P., Bond W. J., Carlson J. M., Cochrane M. A., D'Antonio C. M., DeFries R. S., Doyle J. C., Harrison S. P., Johnston F. H., Keeley J. E., Krawchuk M. A., Kull C. A., Marston J. B., Moritz M. A., Prentice I. C., Roos C. I., Scott A. C., Swetnam T. W., van der Werf G. R., Pyne S. J. Fire in the Earth System // Science. 2009. Vol. 324. P. 481–484. <https://doi.org/10.1126/science.1163886>
- Delcourt C. J. F., Combee A., Izbicki B., Mack M. C., Maximov T., Petrov R., Rogers B. M., Scholten R. C., Sheshtakova T. A., van Wees D., Veraverbeke S. Evaluating the Differenced Normalized Burn Ratio for Assessing Fire Severity Using Sentinel-2 Imagery in Northeast Siberian Larch Forests // Remote Sensing. 2021. Vol. 13, N 12. P. 2311. <https://doi.org/10.3390/rs13122311>
- Giglio L., Justice C., Boschetti L., Roy D. Collection 6 MODIS Burned Area Product User's Guide. 2016. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD64A1.006>
- Giglio L., Schroeder W., Hall J. V., Justice C. O. MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide. 2020.
- Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R.G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Science. 2013. Vol. 342. P. 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Ichoku C., Kaufman Y. J. A method to derive smoke emission rates from MODIS fire radiative energy measurements // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2005. Vol. 43. P. 2636–2649. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.857328>
- Kharuk V. I., Пономарев Е. И., Ivanova G. A., Dvinskaya M. L., Coogan S. C. P., Flannigan M. D. Wildfires in the Siberian taiga // Ambio. 2021. Vol. 50. P. 1953–1974. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>
- Kharuk V. I., Shvetsov E. G., Buryak L. V., Golyukov A. S., Dvinskaya M. L., Petrov I. A. Wildfires in the Larch Range within Permafrost, Siberia // Fire. 2023. Vol. 6. P. 301. <https://doi.org/10.3390/fire6080301>

- Krylov A., McCarty J. L., Potapov P., Loboda T., Tyukavina A., Turubanova S., Hansen M. C. Remote sensing estimates of stand replacement fires in Russia, 2002–2011 // Environ. Res. Lett. 2014. Vol. 9. 105007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/105007>
- Kukavskaya E. A., Buryak L. V., Shvetsov E. G., Conard S. G., Kalenskaya O. P. The impact of increasing fire frequency on forest transformations in southern Siberia // Forest Ecol. Management. 2016. Vol. 382. P. 225–235. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.015>
- Leskinen P., Lindner M., Verkerk P. J., Nabuurs G. J., van Brusselen J., Kulikova E., Hassegawa M., Lericink B. (eds). Russian forests and climate change. What Science Can Tell Us. 2020. Vol. 11 (European Forest Institute). <https://doi.org/10.36333/wsctu11>
- Ponomarev E. I., Zabrodin A. N., Shvetsov E. G., Ponomareva T. V. Wildfire Intensity and Fire Emissions in Siberia // Fire. 2023. Vol. 6, N 7. P. 246. <https://doi.org/10.3390/fire6070246>
- Shvetsov E. G., Kukavskaya E. A., Buryak L. V., Barrett K. Assessment of post-fire vegetation recovery in Southern Siberia using remote sensing observations // Environ. Res. Lett. 2019. Vol. 14. 055001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab083d>
- Shvetsov E. G., Kukavskaya E. A., Shestakova T. A., Laflamme J., Rogers B. M. Increasing fire and logging disturbances in Siberian boreal forests: a case study of the Angara region // Environ. Res. Lett. 2021. Vol. 16. 115007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2e37>
- Sofronov M. A., Volokitina A. V., Kajimoto T. Ecology of wildland fires and permafrost: Their interdependence in the northern part of Siberia // Proceedings of the eighth symposium on the joint Siberian Permafrost studies between Japan and Russia in 1999, 19–20 January 2000 / eds. G. Ioue and A. Takenaka, 211–218. Tsukuba, Japan.
- Sukhinin A. I., French N. H. F., Kasischke E. S., Hewson J. H., Soja A. J., Csizsar I. A. et al. AVHRR-based mapping of fires in Russia: New products for fire management and carbon cycle studies // Remote Sensing of Environment. 2004. Vol. 93. P. 546–564.
- Wooster M. J. Small-scale experimental testing of fire radiative energy for quantifying mass combusted in natural vegetation fires // Geophys. Res. Lett. 2002. Vol. 29, N 21. 2027. <https://doi.org/10.1029/2002GL015487>
- Wooster M. J., Zhang Y. H. Boreal forest fires burn less intensely in Russia than in North America // Geophys. Res. Lett. 2004. Vol. 31. L20505 <https://doi.org/10.1029/2004GL020805>

## Assessment of post-fire forest cover loss in Siberia and its relationship with wildfire characteristics using satellite data

E. G. SHVETSOV

*Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”  
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia*

The paper examines the influence of several fire characteristics including fire energy release, seasonality and duration on the number of wildfires resulting in tree stands mortality in Siberia between 2002 and 2022. Fire energy release was assessed using Fire Radiative Power (FRP), measured using MODIS data. To assess the degree of forest stands disturbance and to identify fires resulted in the forest stand mortality, a global forest cover change product generated from Landsat satellite data was used. Siberia experienced an increase in both total burned area and the area of stand replacing fires between 2002 and 2022. At the same time, an increase in the fire radiative power was also observed. The total values of fire radiative power for stand replacing fires ( $390.2 (\sigma = 80.5) \text{ MW/km}^2$ ) were significantly higher ( $p < 0.01$ ) comparing to fires that did not result in the tree stands mortality ( $291.8 (\sigma = 74.7) \text{ MW/km}^2$ ). Fire radiative power in dark coniferous forests was 20–25% higher comparing to FRP in mixed forests with a predominance of deciduous stands. Stand replacing fires were mainly observed in the late summer with the peak occurring in July – first half of August, while non-stand replacing fires were observed throughout the entire fire season. Stand replacing fires were also characterized by a longer duration (average duration  $4.8 (\sigma = 1.0) \text{ days}$ ) compared to non-stand replacing fires ( $3.9 (\sigma = 0.7) \text{ days}$ ).

**Key words:** wildfires, forest disturbance degree, fire radiative power, FRP, MODIS, Siberia.