

Оценка связи между степенью пожарного воздействия на растительность и мощностью теплоизлучения от пожара

А. Н. Забродин, Е. И. Пономарёв

Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск, 660036, Россия

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

Проведён анализ характеристик пожаров в различных преобладающих древостоях Сибири (50–75° с.ш., 60–150° в.д.) по материалам спутникового мониторинга за период с 2015 по 2021 г. Отобрано 36 пожаров для 7 типов различных древостоев общей площадью 19 382 км². В анализе были использованы 72 снимка спутника Landsat-8/OLI/TIRS (*англ.* Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor), а также данные стандартных продуктов спектрометра MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). На основе обработки дистанционных данных (пороговая классификация значений dNBR (*англ.* Differenced Normalized Burn Ratio, разностный нормализованный индекс гарей)) выявлены статистические закономерности соотношения классов нарушенности для различных типов древостоя. Показано, что при пожарах в светлохвойных насаждениях соотношение классов нарушенности составляет в среднем 44, 29 и 27 % для низкого, среднего и высокого уровня пожарного воздействия соответственно. На послепожарных участках в темнохвойных лесах — 63, 14 и 23 %, а в случае тундровой растительности — 59, 26 и 15 % соответственно. При сопряжённом анализе мощности излучения активных зон пожара по методике FRP (*англ.* Fire Radiative Power — измеренная мощность излучения) был выявлен рост интенсивности пожаров в терминах интегральных значений FRP, пропорциональный увеличению степени пожарного воздействия на растительность. Для репрезентативной выборки пожаров (в различных послепожарных полигонах в 7 вариантах растительного покрова) был определён значимый ($R^2 = 0,77–0,94$) уровень корреляции между значениями NBR/dNBR и интегральными значениями параметра FRP. Инструментально подтверждено, что пожары высокой интенсивности (диапазон 20 000–100 000 МВт) преимущественно фиксируются в светлохвойных насаждениях, где доля средней и высокой степени пожарного воздействия также наибольшая (~56 %). Результаты позволяют рассматривать эти индексы как взаимодополняющие при решении задачи оценки количества сгорающей биомассы, например при вычислении объёмов пожарных эмиссий и т. д.

Ключевые слова: пожары растительности, Сибирь, NBR/dNBR, FRP, радиационная мощность, класс нарушенности, послепожарные участки, доминирующие древостои

Одобрена к печати: 18.09.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-166-175

Введение

Пожары растительности — это наиболее значимый фактор нарушенности лесов Сибири (Барталев, Стыщенко, 2021; Лупян и др., 2022; Kharuk et al., 2021), влияние которого будет усиливаться в связи вероятными климатическими изменениями. Качественно новые пожарные режимы в различных лесах региона могут формироваться уже в ближайшей перспективе. Следует предполагать, что целый ряд природных процессов, связанных с пожарами, будет характеризоваться динамикой на увеличение негативных последствий. Из широкого спектра рассматриваемых послепожарных процессов (Безкоровайная и др., 2017; Корниенко, 2017; Пономарева и др., 2022; Hansen et al., 2013; Kirduyanov et al., 2020; Knorre et al., 2019) мы акцентируем внимание на двух факторах, связанных со степенью нарушенности растительного и почвенного покрова пожарами. Во-первых, ужесточение пожарных режимов напрямую определяет прирост количества сгорающей биомассы и объёмов пожарных эмиссий углерода в атмосферу (Fan et al., 2023; Ponomarev et al., 2021). Во-вторых, высокая степень выгорания растительного покрова становится причиной изменения теплового режима почв послепожарных участков, что имеет наиболее значимые и долговременные последствия в криолитозоне, где возможны значительные аномалии глубины сезонно-талого и мерзлотного слоёв (Пономарева и др., 2022).

На современном этапе дистанционные средства выступают важнейшим инструментом сбора сведений о пожарах в Сибири. Прежде всего это связано с низкой заселённостью региона и отсутствием альтернативных способов обнаружения и контроля пожаров на больших территориях. Поэтому современные технологии как изучения пожаров, так и оценки пожарных эффектов строятся на использовании и обобщении спутниковых данных. В частности, это относится к вопросу анализа пожарного воздействия на растительные покровы, где спутниковые оценки дополняют и позволяют экстраполировать единичные наземные эксперименты. Так, по изменению показателя NBR/dNBR (*англ.* Differenced Normalized Burn Ratio — разностный нормализованный индекс гарей) и его модификаций до и после пожара с достаточной степенью достоверности выделяют четыре класса нарушенности растительности (Delcourt et al., 2021; Ponomarev et al., 2022). Однако задача достоверной оценки и прогноза послепожарных процессов не может решаться без учёта энергетических характеристик и интенсивности горения. Многообразие лесорастительных условий, доминирующих древостоев и вариативность запасов лесных горючих материалов на территории Сибири обуславливают широкий спектр энергетических характеристик горения в каждом случае пожара. Инструментальная оценка интенсивности горения и последующая категоризация отдельных фаз пожара в условиях переменной интенсивности возможны на основе спутникового мониторинга с применением технологии FRP (*англ.* Fire Radiative Power — измеренная мощность излучения). Так, мгновенные значения радиационной мощности FRP от участка активного горения напрямую связаны с интенсивностью горения активной кромки и пропорциональны скорости сгорания биомассы (Kumar et al., 2011; Wooster et al., 2003). Данные о мощности теплоизлучения лесных пожаров применимы также в задачах детектирования очагов верхового горения (Пonomарев и др., 2017) и в оценке степени повреждения древостоев (Лупян и др., 2022; Ponomarev et al., 2022). В настоящей работе мы проверяли основную гипотезу о наличии значимой связи между величинами показателей FRP и dNBR, что в дальнейшем может быть востребовано при калибровке прямых вычислений объёмов сгорающей биомассы на основе спутниковых измерений. В этой связи мы анализировали характерные различия для пожаров во всех вариантах доминирующих древостоев Сибири.

В результатах раскрыты следующие аспекты проблемы: 1) характерная вариативность теплоизлучения активной зоны пожара в разных древостоях; 2) соотношение степени нарушенности пожарами доминирующих вариантов древостоя; 3) связь категорий пожарного воздействия с вариацией интегральных значений FRP.

Исходные данные и методы обработки

Исследование выполнено для территории Сибири (50–75° с.ш., 60–150° в.д.) на площади $\sim 6,0 \cdot 10^6$ км². Здесь сосредоточено до 70 % всех лесов страны, включая обширные ареалы произрастания лиственничных редколесий в притундровой зоне. На данной территории преобладают лиственничные леса и редколесья (лиственница сибирская (*Larix sibirica*), лиственница Гмелина (*L. gmelinii*), лиственница Каяндера (*L. cajanderi*)), насаждения сосны (сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*)), а также темнохвойные леса (сосна сибирская (*Pinus sibirica*), пихта сибирская (*Abies sibirica*), ель сибирская (*Picea obovata*)), кедровый стланик (*Pinus pumila*) и лиственные древостои (берёза (*Betula spp.*), осина (*Populus tremula*)). Пространственное распределение древостоев (*рис. 1*, см. с. 168) показано по материалам данных сервиса «Вега» (Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), <http://pro-vega.ru/maps/>, дата обращения 01.06.2023) (Balashov et al., 2020). Лиственничники занимают до $(2,7...3,0) \cdot 10^6$ км², сосняки — $1,0 \cdot 10^6$ км², темнохвойные — $0,75 \cdot 10^6$ км², смешанные и лиственные леса — до $0,77 \cdot 10^6$ км². В соответствии с приуроченностью пожаров к древостоям мы выделили зоны (см. *рис. 1*), в границах которых была сформирована репрезентативная выборка пожаров для дальнейшего анализа. Датировки пожаров мы контролировали по базе данных спутникового мониторинга Институт леса имени В. Н. Сукачёва Сибирского отделения РАН (ИЛ СО РАН), были выбраны пожары на временном интервале 2015–2021 гг.

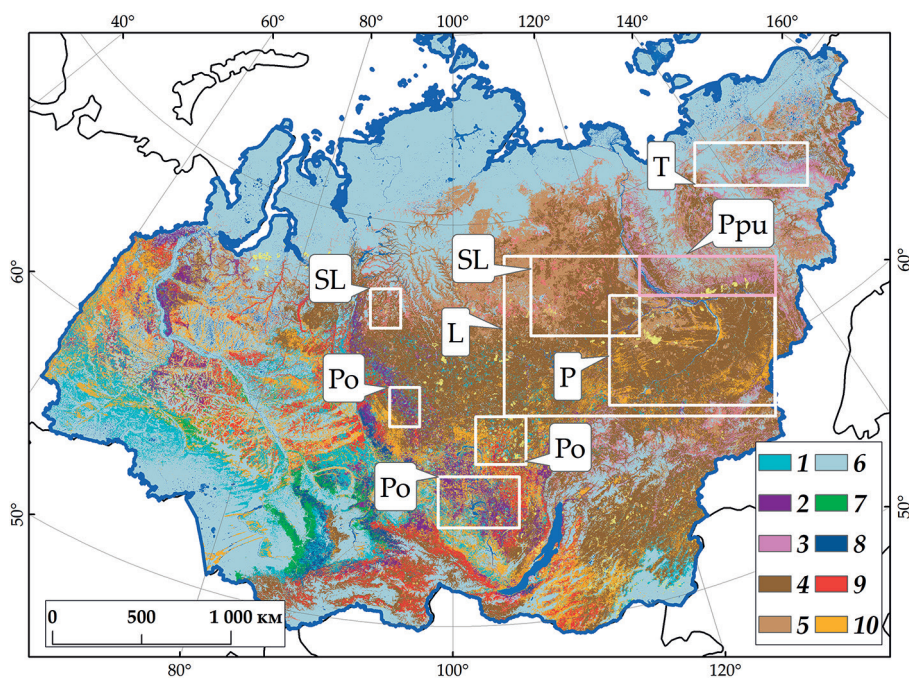


Рис. 1. Район исследования с картой растительности по материалам сервиса «Вега» (ИКИ РАН): 1 — берёза (*Betula spp.*); 2 — ель (*Picea obovata*); 3 — кедровый стланик (*Pinus pumila*); 4 — лиственница (*Larix sibirica*); 5 — лиственничные редколесья (*Sparse larch*); 6 — тундра (*Tundra vegetation*); 7 — осина (*Populus tremula*); 8 — пихта (*Abies sibirica*); 9 — сосна сибирская (*Pinus sibirica*); 10 — сосна (*Pinus sylvestris*) (Balashov et al., 2020). Латинскими буквами обозначены зоны, в которых выбирались послепожарные полигоны с привязкой к преобладающему древостою: L — *Larix sibirica* (лиственница); SL — *Sparse larch* (лиственничные редколесья); P — *Pinus sylvestris* (сосна); Psi — *Pinus sibirica* (сосна сибирская); Ppu — *Pinus pumila* (кедровый стланик); Po — *Picea obovata* (ель); T — *Tundra vegetation* (тундра)

На основе предварительного анализа ГИС-банка (геоинформационные системы) данных пожаров (по материалам ИЛ СО РАН, г. Красноярск) была реализована репрезентативная выборка послепожарных полигонов с датировкой на временном интервале 2015–2021 гг. Всего выборка составила 36 пожаров для 7 типов древостоя общей площадью 19 382 км² (табл. 1). На этой стадии использовалась векторная карта древостоев Сибири по материалам спутниковой системы «Вега-Про» (<http://pro-vega.ru/maps/>, дата обращения 01.06.2023) и стандартные процедуры ГИС пересечения векторных слоёв. Выделяли послепожарные участки, большая часть которых была отнесена к заданному типу растительного покрова, пороговое значение площади доминирующего древостоя было не ниже 63 %.

Таблица 1. Характеристика выборки пожаров в доминирующих древостоях Сибири

Вид растительного покрова	Преобладающий древостой, min–max, среднее, %	Объём выборки	Годы пожаров выборки	Количество снимков	Площадь пожаров выборки, км ²
Лиственница (<i>Larix sp.</i>)	54–92, 79	7	2017–2021	14	10 000
Редколесье (<i>Sparse larch</i>)	63–84, 74	5	2017–2021	10	1 200
Сосна (<i>Pinus sylvestris</i>)	59–87, 72	6	2017–2021	12	1 155
Ель (<i>Picea sp.</i>)	61–67, 64	3	2015–2021	6	542
Сосна сибирская (кедр) (<i>Pinus sibirica</i>)	49–72, 63	5	2015–2021	10	343
Кедровый стланик (<i>Pinus pumila</i>)	51–86, 74	5	2017–2021	10	2 462
Тундра (<i>Tundra vegetation</i>)	66–88, 78	5	2019	10	3 680
Всего	—	36	—	72	19 382

В работе использовались спутниковые снимки Landsat-8/OLI/TIRS (*англ.* Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor), полученные из открытых каталогов (<https://earthexplorer.usgs.gov>, дата обращения 01.06.2023). Всего использовалось 72 снимка для 7 типов растительности (см. *табл. 1*).

Для данной выборки пожаров уровень пожарного воздействия на растительные покровы оценивался с использованием спектрального показателя NBR/dNBR. Классификация степени нарушенности проводилась пороговым методом с учётом соотношений:

$$\text{NBR} = \frac{(\text{NIR} - \text{SWIR})}{(\text{NIR} + \text{SWIR})}, \quad \text{dNBR} = \text{NBR}_{pre} - \text{NBR}_{post},$$

где NIR (*англ.* near infrared) — данные в ближнем инфракрасном диапазоне ($\lambda = 0,85-0,89$ мкм); SWIR (*англ.* short wave infrared) — данные в коротковолновом инфракрасном диапазоне ($\lambda = 2,10-2,30$ мкм); NBR_{pre} — значения для допожарного состояния участка; NBR_{post} — значения, зафиксированные на послепожарных снимках.

Изображения до и после пожара в каталоге данных Landsat были отобраны с привязкой к дате пожара. Временной интервал между снимками Landsat до и после пожара составлял в среднем 1 год в соответствии с требованиями метода (dos Santos et al., 2020). Для рассматриваемых типов древостоя временные диапазоны спутниковых данных были разными. Для выборки пожаров в лиственныхниках допожарные снимки взяты в 2017–2020 гг., послепожарные — в период 2018–2021 гг.; в лиственных редколесьях — в 2018–2021 и 2018–2021 гг. соответственно; в сосновых насаждениях — в 2017–2020 и 2018–2021 гг.; в темнохвойных лесах с преобладанием ели и сосны сибирской (кедра) — в 2015, 2020 гг. до пожаров и в 2016, 2021 гг. после пожаров; в кедровом стланике — в 2017–2020 и 2019–2021 гг. соответственно. В зоне тундры снимки до и после пожаров имели датировку 2019 г. Длительные интервалы более 1 года в нескольких случаях были вызваны отсутствием информативных изображений без облачности.

На основе пороговых диапазонов значений dNBR (Delcourt et al., 2021; dos Santos et al., 2020) выделяли 4 категории пожарного воздействия на растительность: 1 — негоревшие/незначительное повреждение ($\text{dNBR} < 0,099$); 2 — низкий уровень пожарного воздействия ($0,101-0,439$); средний уровень ($0,440-0,659$); высокий уровень ($>0,660$). С использованием диапазонов индекса dNBR проводилась классификация послепожарных участков по 4 категориям с выделением уровня нарушенности растительных покровов пожаром с привязкой к доминирующим древостоям Сибири (*рис. 2*, см. с. 171).

Сопряжённо со степенью нарушенности рассматривали вариацию параметра радиационной мощности теплоизлучения пожаров (FRP), исходя из предположения, что интенсивность горения пропорциональна количеству сгорающей биомассы (Kumar et al., 2011; Wooster et al., 2003), т. е. степени нарушенности. Исходные материалы в формате векторных 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>, дата обращения 01.06.2023).

Радиационная мощность FRP активных зон горения регистрировалась в режиме реального времени спутниковыми системами Aqua, Terra/MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и доступна на рассматриваемый интервал 2015–2021 гг. Значения FRP определены из соотношения:

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

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

Для каждого участка с заданным классом пожарного воздействия в анализе учитывались только те пиксели с рассчитанными значениями индекса dNBR, на которые попадали точки

с данными FRP. Использовалась стандартная ГИС-процедура пространственного пересечения векторных слоёв. Для каждой выборки подсчитывали интегральное значение FRP как сумму значений всех пикселей, соответствующих диапазону dNBR с шагом 0,1. Далее оценивали связь между вариацией NBR/dNBR и интегральными значениями FRP в различных доминирующих древостоях Сибири. Анализировали диаграммы корреляционного поля зависимости интегрального FRP от категории dNBR для разных вариантов древостоев с оценкой коэффициента детерминации (R^2).

Результаты и обсуждение

Данные пороговой классификации уровня пожарного воздействия по индексу dNBR обобщены в табл. 2. Для доминирующих древостоев Сибири (7 вариантов) выявлены схожие соотношения классов нарушенности для трёх групп: светлохвойных, темнохвойных насаждений, а также тундровой растительности (табл. 3).

Таблица 2. Соотношение площадей классов пожарного воздействия (SD — *англ.* standard deviation, стандартное отклонение)

Растительность	Древостои	Площадь пожаров, км ²	Доля площади по индексу dNBR±SD, %			
			1	2	3	4
Светлохвойные	Лиственница, редколесья, сосна	12 355	10±3	34±8	29±4	27±8
Темнохвойные	Ель, сосна сибирская (кедр)	885	28±22	35±15	14±6	23±13
Тундровая растительность	Кедровый стланик, тундры	6 142	15±8	44±10	26±10	15±9

Таблица 3. Обобщённая статистика параметра FRP для вариантов растительности

Растительность	Количество пожаров	Количество точек FRP	FRP, 10 ³ МВт (min–max)	FRP _{ср} , 10 ³ МВт	Сумма FRP, 10 ³ МВт
Лиственница	7	17 860	15–732	234	1636
Лиственничные редколесья	5	2 890	3–119	47	236
Сосна	6	2 100	4–159	35	213
Ель	3	850	0,9–31	16	48
Сосна сибирская (кедр)	5	830	1–79	19	95
Кедровый стланик	5	4 444	12–217	65	325
Тундра	5	6 140	14–205	72	359

Для светлохвойных насаждений характерно преобладание классов среднего и высокого уровня пожарного воздействия (~56 % от общей площади). Для послепожарных участков в темнохвойных древостоях до ~63 % от общей площади составляют классы негоревшей/незначительных повреждений и низкого уровня пожарного воздействия. Для растительности с преобладанием тундры и кедрового стланика (*Pinus pumila*) выявлено доминирование низкого и среднего уровня пожарного воздействия (~70 % от общей площади).

Пример совмещения данных dNBR и FRP показан на рис. 2.

Для рассмотренной выборки пожаров интегральные значения FRP варьировали на уровне 3000–732 000 МВт в светлохвойных насаждениях, 12 000–217 000 МВт — в зоне редколесий и тундры и до 900–79 000 МВт — в зоне темнохвойных (см. табл. 3). Инструментально подтверждено, что пожары высокой интенсивности (интегральные значения FRP в границах одного пожара — 20 000–100 000 МВт) преимущественно фиксируются в светлохвойных насаждениях (лиственница, лиственничные редколесья и сосняки), где выделяемые категории

средней и высокой степени пожарного воздействия также были наибольшие и составляли ~56 % общей площади повреждения. Так, по данным работы (Krylov et al., 2014), на светлохвойные древостои приходится до 65 % всех пожаров Российской Федерации. Именно горение светлохвойных лесов Сибири ежегодно определяет большую часть статистики пожаров (Kharuk et al., 2021). Значительный уровень воздействия пожаров в этих лесах обусловлен двукратным превышением интенсивности в терминах FRP по сравнению с темнохвойными древостоями (см. табл. 3). В то же время тип линейной зависимости FRP от dNBR сохраняется для пожаров во всех вариантах растительного покрова Сибири (рис. 3).

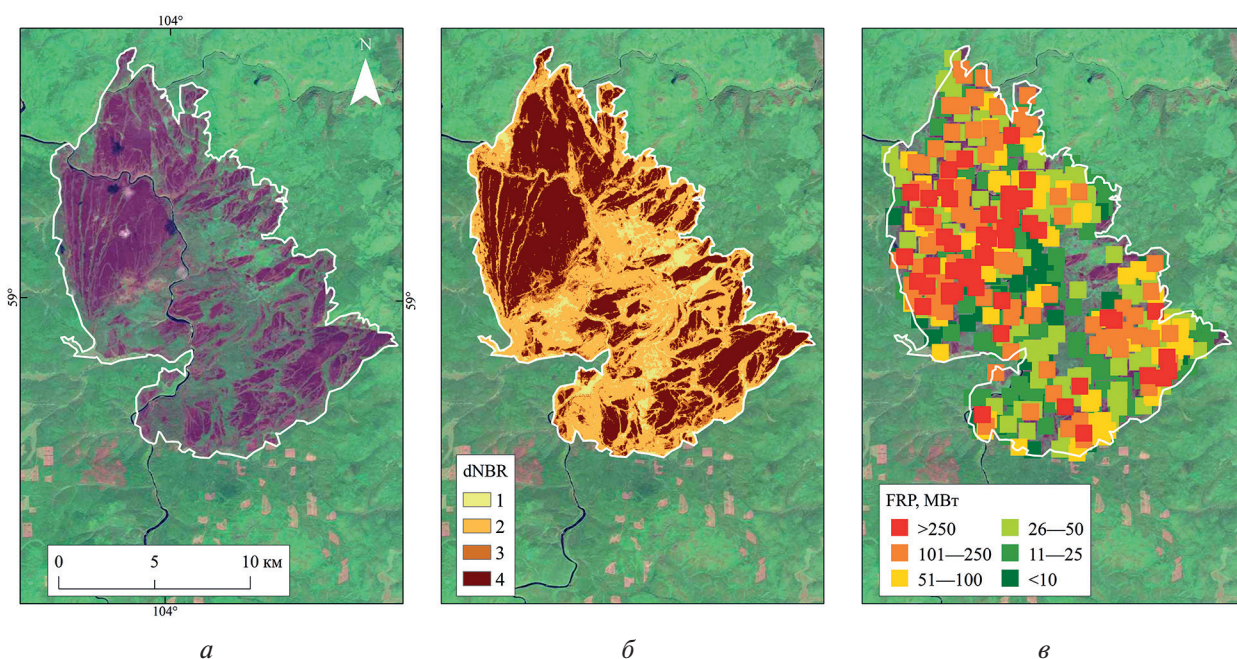


Рис. 2. Послепожарный полигон на территории с преобладанием темнохвойной растительности сосна сибирская (кедр), снимок Landsat-8, 2018 г: а — исходное изображение послепожарного участка; б — классификация на основе пороговых значений индекса dNBR; в — значения FRP во всех точках измерений

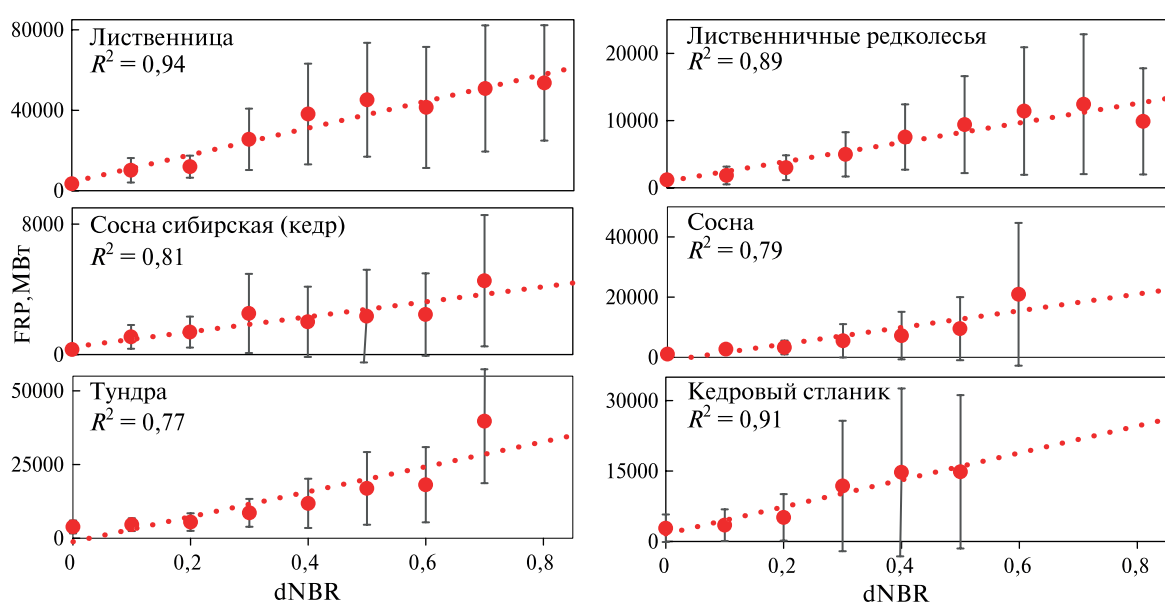


Рис. 3. Корреляция между FRP и категориями нарушения растительности в терминах dNBR для преобладающих типов древостоев и растительного покрова в Сибири

Графики корреляционного поля демонстрируют значимый ($R^2 = 0,77-0,94$, $p < 0,05$) уровень корреляции между интенсивностью по FRP и категориями нарушенности растительности в терминах dNBR (см. рис. 3). Результат укладывается в представление о том, что рост интенсивности горения определяет увеличение сгорающей массы растительных материалов, описываемый для многих вариантов растительного покрова (Kumar et al., 2011; Wooster et al., 2003), включая леса Сибири (Пономарев и др., 2017, 2018).

Заключение

Проведённый анализ позволил выявить закономерности соотношения классов нарушенности для разных древостоев в терминах диапазонов dNBR. Показано, что классы высокой степени послепожарной нарушенности преобладают в светлохвойных насаждениях, составляя 44, 29 и 27 % для низкого, среднего и высокого уровня пожарного воздействия соответственно. На послепожарных участках в темнохвойных лесах — 63, 14 и 23 %, а в случае тундровой растительности — 59, 26 и 15 %. Соответствующие интегральные значения теплоизлучения от пожаров (FRP) в светлохвойных древостоях также имели значительные экстремумы до 730 000 МВт, существенно превышающие данную характеристику для пожаров в зоне тундры (>200 000 МВт) или в темнохвойных лесах (до 79 000 МВт).

Между параметром dNBR и интегральной радиационной мощностью (FRP) выявлена значимая прямая корреляция ($R^2 = 0,77-0,94$, $p < 0,05$), что позволяет рассматривать эти индексы как взаимодополняющие при решении задачи оценки количества сгорающей биомассы. Ранее было показано (Ponomarev et al., 2023), что интегральная мощность от пожаров имеет устойчивый положительный тренд в пределах Сибири. Следовательно, полученные в данной работе результаты позволяют прогнозировать и усиление пожарного воздействия, поскольку параметры dNBR и FRP характеризуются высокой корреляционной связью.

Работа выполнена в рамках госзадания FWES-2022-0001 (Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения РАН» (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 огнём площади // Лесоведение. 2021. № 2. С. 115–122. DOI: 10.31857/S0024114821020029.
2. Безкоровайная И. Н., Борисова И. В., Климченко А. В., Шабалина О. М., Захарченко Л. П., Ильин А. А., Бескровный А. К. Влияние пирогенного фактора на биологическую активность почв в условиях многолетней мерзлоты (Центральная Эвенкия) // Вестн. КрасГАУ. 2017. № 9. С. 181–189.
3. Корниенко С. Г. Изучение трансформаций тундрового напочвенного покрова на участках пирогенного поражения по данным спутников Landsat // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 1. С. 93–104.
4. Лузян 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., 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.
6. Пономарев Е. И., Швецов Е. Г., Литвинцев К. Ю. Калибровка оценок пожарных эмиссий на основе данных дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 5. С. 41–51. DOI: 10.31857/S020596140003239-3.
7. Пономарева Т. В., Пономарев Е. И., Литвинцев К. Ю. и др. Тепловое состояние нарушенных почв в криолитозоне Сибири на основе дистанционных данных и численного моделирования // Вычислительные технологии. 2022. Т. 27. № 3. С. 16–35. DOI: 10.25743/ICT.2022.27.3.003.

8. *Balashov I., Bartalev S., Burtsev M. et al.* Vega-Les Information System. Actual Features and Future Evolution. // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. 2020. V. 507. DOI: 10.1088/1755-1315/507/1/012002.
9. *Delcourt C.J.F., Combee A., Izbicki B. et al.* Evaluating the Differenced Normalized Burn Ratio for Assessing Fire Severity Using Sentinel-2 Imagery in Northeast Siberian Larch Forests // Remote Sensing. 2021. V. 13. Iss. 12. Article 2311. DOI: 10.3390/rs13122311.
10. *dos Santos S.M.B., Bento-Gonçalves A., Franca-Rocha W., Baptista G.* Assessment of Burned Forest Area Severity and Postfire Regrowth in Chapada Diamantina National Park (Bahia, Brazil) Using dNBR and RdNBR Spectral Indices // Geosciences. 2020. V. 10. No. 106. DOI: 10.3390/geosciences10030106.
11. *Fan L., Wigneron J.P., Ciais P. et al.* Siberian carbon sink reduced by forest disturbances // Nature Geoscience. 2023. V. 16. Iss. 1. P. 56–62. DOI: 10.1038/s41561-022-01087-x.
12. *Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R. et al.* High-resolution global maps of 21st century forest cover change // Science. 2013. V. 342. P. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693.
13. *Kharuk V.I., Ponomarev E.I., Ivanova G.A. et al.* Wildfires in the Siberian taiga // Ambio. 2021. V. 50. Iss. 11. P. 1953–1974. DOI: 10.1007/s13280-020-01490-x.
14. *Kirilyanov A., Saurer M., Siegwolf R. et al.* Long-term ecological consequences of forest fires in the continuous permafrost zone of Siberia // Environmental Research Letters. 2020. V. 15. No. 3. DOI: 10.1088/1748-9326/ab7469.
15. *Knorre A.A., Kirilyanov A.V., Prokushkin A.S. et al.* Tree ring-based reconstruction of the long-term influence of wildfires on permafrost active layer dynamics in Central Siberia // Science of the Total Environment. 2019. V. 652. P. 314–319. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.124.
16. *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. No. 10. P. 1–8. DOI: 10.1088/1748-9326/9/10/105007.
17. *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. P. 1–18. DOI: 10.1029/2011JD015676.
18. *Ponomarev E.I., Yakimov N.D., Ponomareva T.V. et al.* Current Trend of Carbon Emissions from Wildfires in Siberia // Atmosphere. 2021. V. 12. Iss. 5. Article 559. DOI: 10.3390/atmos12050559.
19. *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.
20. *Ponomarev E., Zabrodin A., Shvetsov E., Ponomareva T.* Wildfire Intensity and Fire Emissions in Siberia // Fire. 2023. V. 6. Iss. 7. Article 246. DOI: 10.3390/fire6070246.
21. *Wooster M.J., Zhukov B., Oertel D.* Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning. Derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products // Remote Sensing of Environment. 2003. V. 86. Iss. 1. P. 83–107. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00070-1.

Dependence assessment between the degree of fire impact on vegetation and the fire radiative power

A. N. Zabrodin, E. I. Ponomarev

Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia
E-mails: azabrodin@ksc.krasn.ru, evg@ksc.krasn.ru

The article provides the results of analysis of the characteristics of wildfires in various predominant stands of Siberia (50–75° N, 60–150° E) based on satellite monitoring data from 2015 to 2021. 36 fires were selected for 7 types of different tree stands (vegetation types) with a total area of 19 382 km². 72 images of the Landsat-8 OLI/TIRS (Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor) satellite were used in the analysis, as well as data from standard products of the MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Based on the processing of remote data (threshold classification of dNBR (Differenced Normalized Burn Ratio) values), statistical patterns of the ratio of disturbance classes for various types of stands were revealed. It is shown that in the case of fires in light coniferous stands, the ratio of disturbance classes is on average 44, 29 and 27 % for low, medium and high levels of fire impact, respectively. While this proportion is 63, 14 and 23 % in the case of dark coniferous

forests, and 59, 26 and 15 % in the case of tundra vegetation, respectively. The conjugate analysis of the radiation power of active fire zones using the Fire Radiative Power (FRP) technique demonstrated an increase in the intensity of fires in terms of integral FRP values, proportional to the increase in the degree of fire impact on vegetation. For a representative sample of fires (in various post-fire polygons in 7 variants of vegetation cover), a significant ($R^2 = 0.77-0.94$, $p > 0.05$) level of correlation was revealed between the values of the Normalized Burn Ratio (NBR/dNBR) and the integral values of the FRP parameter. It has been instrumentally confirmed that high intensity fires (20 000–100 000 MW) are mainly recorded in light coniferous plantations, where the proportion of medium and high degree of fire impact is the greatest (~56 %) as well. The results allow us to consider these indices as complementary when solving the problem of estimating the amount of burning biomass, for example, when calculating the volume of direct fire emissions.

Keywords: vegetation fires, Siberia, NBR/dNBR, FRP, radiation power, disturbance class, post-fire plots, dominant tree stands

Accepted: 18.09.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-166-175

References

1. Bartalev S. A., Stycenko 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*, 2021, No. 2, pp. 115–122 (in Russian), DOI: 10.31857/S0024114821020029.
2. Bezkorovainaya I. N., Borisova I. V., Klimchenko A. V., Shabalina O. M., Zakharchenko L. P., Ilyin A. A., Beskrovny A. K., The influence of pyrogenic factor on biological activity of soils under conditions of permafrost (Central Evenkia), *Bull. KrasGAU*, 2017, No. 9, pp. 181–189 (in Russian).
3. Kornienko S. G., Transformation of tundra land cover at the sites of pyrogenic disturbance: studies based on Landsat satellite data, *Kriosfera Zemli*, 2017, Vol. 21, No. 1, pp. 93–104 (in Russian).
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, *Sovremennyye 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., 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.
6. Ponomarev E., Shvetsov E., Litvintsev K., Calibration of estimates on direct wildfire emissions based on remote sensing data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2018, No. 5, pp. 41–51 (in Russian), DOI: 10.31857/S020596140003239-3.
7. Ponomareva T. V., Ponomarev E. I., Litvintsev K. Yu. et al., Thermal state of disturbed soils in the permafrost zone of Siberia according the remote data and numerical simulation, *J. Computational Technologies*, 2022, Vol. 27, No. 3, pp. 16–35 (in Russian), DOI: 10.25743/ICT.2022.27.3.003.
8. Balashov I., Bartalev S., Burtsev M. et al., Vega-Les Information System. Actual Features and Future Evolution, *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*, 2020, Vol. 507, DOI: 10.1088/1755-1315/507/1/012002.
9. Delcourt C. J. F., Combee A., Izbicki B. et al., Evaluating the Differenced Normalized Burn Ratio for Assessing Fire Severity Using Sentinel-2 Imagery in Northeast Siberian Larch Forests, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, Issue 12, Article 2311, DOI: 10.3390/rs13122311.
10. dos Santos S. M. B., Bento-Gonçalves A., Franca-Rocha W., Baptista G., Assessment of Burned Forest Area Severity and Postfire Regrowth in Chapada Diamantina National Park (Bahia, Brazil) Using dNBR and RdNBR Spectral Indices, *Geosciences*, 2020, Vol. 10, No. 106, DOI: 10.3390/geosciences10030106.
11. Fan L., Wigneron J. P., Ciais P. et al., Siberian carbon sink reduced by forest disturbances, *Nature Geoscience*, 2023, Vol. 16, Issue 1, pp. 56–62, DOI: 10.1038/s41561-022-01087-x.
12. Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R. et al., High-resolution global maps of 21st century forest cover change, *Science*, 2013, Vol. 342, DOI: 10.1126/science.1244693.
13. Kharuk V. I., Ponomarev E. I., Ivanova G. A. et al., Wildfires in the Siberian taiga, *Ambio*, 2021, Vol. 50, Issue 11, pp. 1953–1974, DOI: 10.1007/s13280-020-01490-x.
14. Kirdeyanov A., Saurer M., Siegwolf R. et al., Long-term ecological consequences of forest fires in the continuous permafrost zone of Siberia, *Environmental Research Letters*, 2020, Vol. 15, No. 3, DOI: 10.1088/1748-9326/ab7469.

15. Knorre A. A., Kirilyanov A. V., Prokushkin A. S. et al., Tree ring-based reconstruction of the long-term influence of wildfires on permafrost active layer dynamics in Central Siberia, *Science of the Total Environment*, 2019, Vol. 652, pp. 314–319, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.124.
16. 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, No. 10, pp. 1–8, DOI: 10.1088/1748–9326/9/10/105007.
17. 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, pp. 1–18, DOI: 10.1029/2011JD015676.
18. Ponomarev E. I., Yakimov N. D., Ponomareva T. V. et al., Current Trend of Carbon Emissions from Wildfires in Siberia, *Atmosphere*, 2021, Vol. 12, Issue 5, Article 559, DOI: 10.3390/atmos12050559.
19. 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.
20. Ponomarev E., Zabrodin A., Shvetsov E., Ponomareva T., Wildfire Intensity and Fire Emissions in Siberia, *Fire*, 2023, Vol. 6, Issue 7, Article 246, DOI: 10.3390/fire6070246.
21. Wooster M. J., Zhukov B., Oertel D., Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning. Derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products, *Remote Sensing of Environment*, 2003, Vol. 86, Issue 1, pp. 83–107, DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00070-1.