Исследование влияния мощности теплоизлучения лесных пожаров на степень повреждения лесов на территории юга средней Сибири по спутниковым данным

Е. Г. Швенов

Федеральный исследовательский центр Красноярского научного центра СО РАН Красноярск, 660036, Россия

Хакасский государственный университет, Абакан, 655017, Россия E-mail: eugeneshvetsov11@yandex.ru

На основе данных радиометра MODIS выполнена оценка дистанционно регистрируемой мощности теплоизлучения лесных пожаров и рассмотрено её влияние на степень пирогенной нарушенности растительного покрова на гарях. Для анализа использованы данные о крупных пожарах, площадью более 1500 га, обнаруженных на территории юга средней Сибири в период с 2001 по 2021 г. С использованием спутникового продукта глобального изменения лесного покрова, полученного на основе данных Landsat, выполнен расчёт доли пожарного пикселя, где имела место гибель древостоя. Для пожаров, действующих в лесах с преобладанием темнохвойных (*Pinus sibirica*, *Abies sibirica*) и лиственничных (*Larix sibirica*) пород, свойственны более высокие значения мощности теплоизлучения по сравнению с пожарами в лиственных лесах (*Betula spp., Populus tremula*) и сосняках (*Pinus silvestris*) (выше на 25–30 %). Выявлено наличие значимой корреляционной связи ($R^2 = 0.46$; p < 0.05) между величиной мощности теплоизлучения пожара и степенью пирогенной нарушенности участков, пройденных огнём, оцениваемой с помощью спектрального индекса dNBR. Установлено наличие статистически значимой связи между индексом dNBR и долей площади пожарного пикселя, в которой наблюдалась гибель древостоя.

Ключевые слова: пожары растительности, дистанционные данные, MODIS, мощность теплоизлучения пожаров, вегетационные индексы, Сибирь

> Одобрена к печати: 23.09.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-136-146

Введение

Лесные пожары — один из наиболее существенных факторов, влияющих на динамику растительности, биоразнообразие и углеродный цикл в лесах России (Барталев и др., 2015; Леса..., 2020). Воздействие пожаров на леса определяется рядом факторов, включая вид и интенсивность пожара, породный состав и возрастную структуру древостоев, почвенные условия и др. Пожары могут приводить как к стимуляции естественного возобновления в лесах, так и к полной гибели древостоев и трансформации лесных экосистем в степные (Буряк и др., 2016; Kukavskaya et al., 2016). Так, в лиственничных и сосновых лесах, преобладающих на территории Сибири, пожары низкой интенсивности способствуют возобновлению древостоя (Kharuk et al., 2021). В то же время высокоинтенсивные или повторяющиеся пожары в таких лесах приводят к гибели древостоя (Kukavskaya et al., 2016; Shvetsov et al., 2019). В частности, на территории южной Сибири произошло сокращение площадей Алтайских и Минусинских боров, Балгазынского бора республики Тыва и Цасучейского бора в Забайкальском крае (Буряк и др., 2011). При этом можно отметить, что лиственничные леса Сибири характеризуются значительной долей высокоинтенсивных пожаров, приводящих к гибели древостоя (Krylov et al., 2014; Ponomarev et al., 2022). 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 можно отметить, что в течение последних 15 лет на территории России наблюдался рост числа пожаров, приводящих к гибели древостоя (Барталев, Стыценко, 2021).

Применение спутниковых средств мониторинга позволяет лучше оценить исторические и текущие факторы, такие как пожары растительности, влияющие на динамику лесов и изменения растительного покрова (Барталев и др., 2015). Данные спутниковых радиометров позволяют не только обнаруживать очаги пожаров, но и оценивать количество энергии, выделяемой в процессе горения биомассы (Wooster, 2002). Благодаря этому можно оценивать интенсивность кромки пожара и скорость сгорания биомассы (Wooster, Zhang, 2004). В частности, использование данных о мощности теплоизлучения пожаров (англ. Fire Radiative Power — FRP), полученных с помощью спутниковых систем, позволило выполнять детектирование очагов верхового горения и анализировать интенсивность горения в зависимости от погодных условий на территории Сибири (Пономарев и др., 2017; Швецов, Пономарев, 2015), а также оценивать степень повреждения лесов пожарами (Лупян и др., 2022).

Спектральные индексы, такие как нормализованный разностный вегетационный индекс (англ. Normalized Difference Vegetation Index — NDVI) или нормализованный индекс гарей (англ. Normalized Burn Ratio — NBR), широко применяются при изучении степени повреждения лесов огнём и их послепожарного восстановления. Ранее было показано, что данные индексы могут успешно применяться для оценки степени пирогенного повреждения лесов (Барталев и др., 2010; Chu et al., 2017; French et al., 2008) на территории бореальной зоны. В частности, отмечается, что величина индекса dNBR (англ. Differenced Normalized Burn Ratio, разностный нормализованный индекс гарей) достаточно хорошо коррелирует со степенью пирогенной нарушенности растительности в лиственничных лесах Сибири (Delcourt et al., 2021). Также было показано, что степень пирогенного повреждения лесов, оцениваемая с помощью индекса NBR, является значимым фактором, влияющим на послепожарную динамику лесов юга Сибири (Shvetsov et al., 2019).

Основной целью настоящей работы стал анализ связи между мощностью теплоизлучения пожаров и количественными индикаторами состояния лесного покрова, такими как индекс dNBR и доля погибшего древостоя, по данным дистанционных измерений. Задачи исследования включали: 1) оценку зависимости мощности теплоизлучения лесных пожаров от преобладающих древесных пород; 2) анализ связи между мощностью теплоизлучения и степенью пирогенной нарушенности растительности, оцениваемой с помощью индекса dNBR; 3) оценку доли площади, на которой имела место гибель древостоя, для участков с разной степенью нарушенности растительного покрова.

Материалы и методы

Исследования были выполнены для территории юга средней Сибири в границах $50-58^{\circ}$ с. ш. и $86-99^{\circ}$ в. д. общей площадью около $7,5\cdot10^{5}$ км² (рис. 1, см. с. 138). Согласно использованной в работе карте растительности, доступной через сервис Vega (Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, http://pro-vega.ru/maps/) (Барталев и др., 2016), преобладающими лесообразующими породами являются лиственница (Larix sibirica) (19 % лесной площади района исследования), кедр (Pinus sibirica) (16 %), пихта (Abies sibirica) (14 %), сосна (Pinus sylvestris) (13 %). Значительная часть площади лесов (33 %) приходится на смешанные леса с преобладанием лиственных пород (Betula spp., Populus tremula).

В работе использован архив тематических продуктов, сформированных по данным радиометра MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) за 2001—2021 гг. Загрузка данных выполнялась с помощью сервиса LAADS (англ. Level-1 and Atmosphere Archive and Distribution System, https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov). Использовались следующие продукты: продукт площади пожаров (MCD64A1, пространственное разрешение 500 м) (Giglio et al., 2016); продукт тепловых аномалий (MOD14A1, пространственное разрешение 1000 м), содержащий оценки мощности теплоизлучения пожара (FRP) (Giglio et al., 2020); продукт спектральной отражательной способности (MOD09A1, пространственное разрешение 500 м) (Vermote, 2015). С помощью карты преобладающих лесообразующих пород выполнялась привязка пожаров к основным лесообразующим породам района исследования.

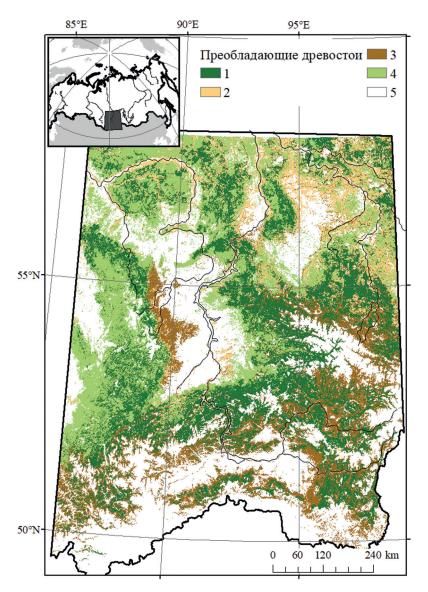


Рис. 1. Район исследований. Преобладающие древесные породы показаны согласно карте растительности ИКИ РАН (http://pro-vega.ru/maps/) (Барталев и др., 2016). На вставке отмечено расположение района исследования. Цифрами отмечены преобладающие породы: 1 — темнохвойные леса; 2 — леса с преобладанием сосны; 3 — лиственничные леса; 4 — лиственные леса; 5 — нелесные земли

Для детектирования участков, где имела место гибель лесного покрова, использовался глобальный продукт изменения лесного покрова (Hansen et al., 2013) версии 1.9, находящийся в открытом доступе (https://storage.googleapis.com/earthenginepartners-hansen/GFC-2021-v1.9/download.html). Этот продукт сформирован по данным Landsat-7, -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 2021 г.

С использованием геоинформационных систем (ГИС) выполнялось объединение отдельных пожарных пикселей продукта MCD64A1 в пожарные полигоны путём применения пространственных и временных критериев, аналогичных описанным ранее (Shvetsov et al., 2021). В результате были сформированы ГИС-слои, содержащие контуры и даты гарей за каждый год с 2001 по 2021 г. В работе использовалась выборка полигонов, соответствовавших крупным лесным пожарам (более 1500 га). В разные годы фиксировалось от 40 до 250 таких гарей, а итоговый объём выборки составил около 3000 гарей (4 % от общего числа пожаров, или около 19 % от лесных пожаров).

С использованием продукта тепловых аномалий для каждого пикселя в пределах полученых полигонов гарей были получены значения мощности теплоизлучения пожара (FRP). В случаях, когда одному пожарному пикселю соответствовало несколько значений FRP, использовалось максимальное значение. Для анализа мощности тепловыделения выполнялось разбиение всего диапазона на интервалы по 50 МВт/км². Для каждого интервала вычислялось количество пожарных пикселей, что характеризует частоту встречаемости пожара с заданным значением мощности теплоизлучения, а также её среднее значение.

Для оценки состояния растительности использовался нормализованный индекс гарей (NBR), рассчитанный на основе продукта отражательной способности MODIS. Для расчёта индекса NBR были взяты данные каналов MODIS: 2-го (0,841–0,876 мкм) и 7-го (2,105–2,155 мкм). Для оценки степени пирогенной нарушенности растительного покрова использовалась разность нормализованных индексов гарей dNBR (French et al., 2008; Key, Benson, 2006). Этот показатель вычислялся как разница между значениями NBR, рассчитанными в год, предшествовавший пожару, и в следующий после пожара год.

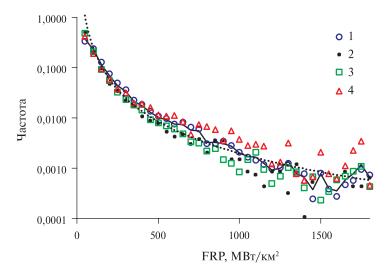
Далее, для каждого пожарного пикселя MODIS по данным продукта изменения лесного покрова рассчитывался процент площади, на которой имела место гибель древостоя. Данный показатель вычислялся как доля пикселей продукта изменения лесного покрова (пространственное разрешение 30 м), в которых имела место гибель 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 три года согласно подходу, использованному 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 трёх лет после пирогенного воздействия.

Таким образом, для каждого пожарного пикселя была получена следующая информация: мощность теплоизлучения, выделенная в процессе горения (FRP); степень пирогенной нарушенности растительного покрова (индекс dNBR); преобладающие древесные породы; а также процент площади лесов, погибших в результате пожара.

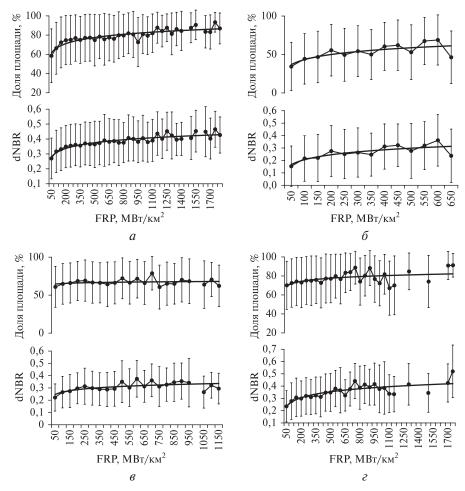
Результаты и обсуждение

Распределение мощности теплоизлучения пожаров было аппроксимировано по степенному закону ($R^2 = 0.92$; p < 0.05) (рис. 2, см. с. 140). Подобный характер распределения согласуется с результатами, ранее полученными для бореальных лесов Евразии и Северной Америки (Швецов, Пономарев, 2015; Wooster, Zhang, 2004). Средняя мощность теплоизлучения пожаров, обнаруженных в районе исследования, составила $37,4\pm26,4$ MBт/км². При этом наименьшие значения FRP отмечались для сосновых и лиственных древостоев (33,8±34,5 и $30,1\pm29,3$ MBт/км² соответственно) (см. *puc. 2*). Более высокие средние значения были зарегистрированы для лесов с преобладанием темнохвойных пород $(42,8\pm44,1~{\rm MBT/km^2})$ и лиственничных лесов (46,6±42,7 MBт/км²). Полученные значения мощности теплоизлучения в целом соответствовали ранее полученным оценкам для центральных и северных районов Средней и Восточной Сибири (Швецов, Пономарев, 2015) и были примерно на 20 % выше оценок для Алтае-Саянского региона (Пономарев и др., 2015). Анализ с использованием U-критерия Манна – Уитни показал, что различия в мощности теплоизлучения между лесами с разными преобладающими породами следует признать значимыми на уровне 0,05. Исключением были пожары в лесах с преобладанием сосновых древостоев и смешанных пород, различия между которыми не были значимыми.

Значения мощности теплоизлучения пожарных пикселей также сопоставлялись с соответствующими значениями dNBR. Для пожарных пикселей из каждого интервала размером $50 \, \mathrm{MBT/km^2}$ рассчитывалось среднее значение FRP, а также среднее значение и стандартное отклонение индекса dNBR.



 $Puc.\ 2.$ Распределение частоты пожарных пикселей в зависимости от их радиационной мощности. Сплошная линия соответствует всем пожарным пикселям, штриховой линией обозначена её аппроксимация по степенному закону ($R^2=0.92$). Цифрами отмечены распределения FRP для лесов с различными преобладающими древостоями: 1- лиственничные леса; 2- леса с преобладанием лиственных пород; 3- леса с преобладанием сосны; 4- леса с преобладанием темнохвойных пород



 $Puc.\ 3.$ Величина индекса dNBR и доля площади, на которой имела место гибель древостоя, в зависимости от радиационной мощности пожара: a — для лиственничных лесов; b — лесов с преобладанием лиственных пород; b — лесов с преобладанием сосны; b — лесов с преобладанием темнохвойных пород. Планки погрешности соответствуют одному стандартному отклонению. Каждая точка отмечает среднее значение показателя (dNBR или доля площади) для соответствующего интервала FRP. На рисунке не показаны значения для интервалов, в которых число пожарных пикселей было менее b

Пожарные пиксели в пределах каждого рассмотренного интервала мощности теплоизлучения характеризовались существенными вариациями индекса dNBR (стандартное отклонение на puc. 3, см. с. 140). Связь между величиной FRP и средними значениями dNBR в интервалах мощности теплоизлучения может быть аппроксимирована по логарифмическому закону ($R^2 = 0.46$; p < 0.05) (см. puc. 3). Так, например, в случае лиственничных древостоев рост величины FRP с 50 до 750 MBT/км² сопровождался ростом индекса dNBR примерно на 43 % (см. puc. 3a). В то же время дальнейшее возрастание мощности теплоизлучения практически не приводило к соответствующему увеличению dNBR. Так, изменение FRP с 750 до 1750 MBT/км² привело к росту dNBR примерно только на 8 %. Величина FRP связана с интенсивностью тепловыделения на кромке пожара, в то время как показатель dNBR оценивает степень пирогенного повреждения растительности (Key, Benson, 2006; Wooster, 2002). Учитывая, что интенсивность горения — один из существенных факторов, определяющих степень повреждения растительности при пожаре (Keeley, 2009), полученный результат становится закономерным.

Можно отметить, что наибольший процент гибели древостоев наблюдался в лиственничных ($70\pm29~\%$) и темнохвойных ($73\pm29~\%$) лесах, что примерно на 15 и 70 % выше, чем в случае сосновых лесов ($64\pm30\%$) или лесов с преобладанием лиственных пород ($43\pm31~\%$) соответственно (см. рис. 3, таблица).

Средние значения мощности теплоизлучения и доли площади, где наблюдалась гибель древостоя, для участков гарей с низкой/средней (dNBR < 0,44) и высокой (dNBR $\geqslant 0,44$) степенью пирогенной нарушенности

| Преобладающая порода | Мощность теплоизлучения (FRP), МВт/км ² | | Доля площади, на которой наблюдалась гибель древостоя | |
|-------------------------|--|-------------|---|-------------|
| | dNBR < 0,44 | dNBR ≥ 0,44 | dNBR < 0,44 | dNBR ≥ 0,44 |
| Лиственница | 40,2±36,5 | 69,5±69,1 | 64,7±32,1 | 94,1±22,1 |
| Лиственные | 25,1±23,9 | 52,6±53,1 | 35,5±36,2 | 50,5±24,3 |
| Сосна | 28,7±29,1 | 58,3±61,5 | 60,9±31,4 | 86,2±27,5 |
| Темнохвойные | 31,9±31,3 | 67,6±72,3 | 68,6±30,4 | 96,4±25,7 |

Согласно ранее представленной классификации (Key, Benson, 2006), пирогенно нарушенные участки с величиной индекса dNBR более 0,44 могут характеризоваться как имеющие высокую степень нарушенности растительного покрова. Можно отметить, что для всех рассмотренных в работе типов преобладающих пород имело место значимое на уровне 0,05 различие в мощности теплоизлучения и доли площади погибших лесов между участками с величиной dNBR более 0,44 и менее 0,44 (см. *таблицу*). Так, на территориях, пройденных огнём, для которых значение dNBR превышало 0,44, среднее значение мощности теплоизлучения пожаров было на 72–116 % выше, чем для участков с dNBR менее 0,44. При этом доля площади, на которой отмечалась гибель древостоя, для участков с dNBR более 0,44 варьировалась от 74 до 91 %, что на 40–50 % выше по сравнению с территориями, где индекс dNBR был менее 0,44 (см. *таблицу*).

Ранее отмечалось (Барталев и др., 2010), что значения вегетационного индекса, основанного на коротковолновом инфракрасном канале, на уровне 0,4 и выше в основном соответствуют усыхающим и погибшим древостоям. Тем не менее даже пожары с низкими значениями FRP могли приводить к гибели древостоя, что особенно заметно в случае лесов с преобладанием темнохвойных пород (см. *puc. 3*). Тот факт, что гибель лесов наблюдается даже для пожаров, имеющих достаточно низкую интенсивность горения, также отмечался ранее (Лупян и др., 2022), на основании чего авторами был сделан вывод о некорректности использования пороговых методов при анализе гибели древостоя в зависимости от интенсивности пожаров.

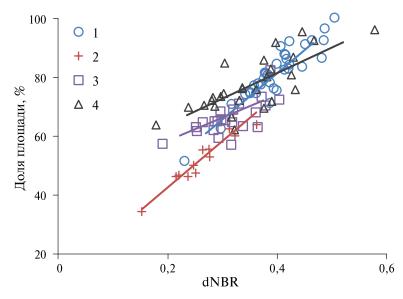


Рис. 4. Доля площади, на которой имела место гибель древостоя, в зависимости от величины индекса dNBR: 1 — для лиственничных лесов; 2 — лесов с преобладанием лиственных пород; 3 — лесов с преобладанием сосны; 4 — лесов с преобладанием темнохвойных пород. Каждая точка соответствует среднему значению dNBR или доли площади в пределах соответствующего интервала FRP (см. рис. 3). Линии регрессии показаны прямыми линиями соответствующего цвета

На *puc.* 4 показана связь между значениями индекса dNBR и соответствующими им значениями послепожарной гибели древостоя, полученными на основании данных *puc.* 3. Анализ связи между этими величинами показал наличие статистически значимой линейной связи (см. *puc.* 4). Так, для разных преобладающих пород значение коэффициента детерминации (R^2) менялось от 0,5 в случае сосновых лесов до 0,8 в лесах с преобладанием лиственных пород при уровне достоверности p < 0,05.

Наличие линейной связи между спектральными индексами, основанными на использовании среднего инфракрасного диапазона, и послепожарным состоянием растительности также отмечалось ранее (Барталев и др., 2010).

Заключение

Для территории южных районов Средней Сибири выполнена оценка дистанционно регистрируемой мощности теплоизлучения лесных пожаров и рассмотрено её влияние на степень пирогенной нарушенности растительного покрова на гарях. В привязке к картам преобладающих пород установлено, что мощность теплоизлучения в темнохвойных и лиственничных лесах в среднем на 25–30 % выше, чем при горении лиственных и сосновых лесов.

Установлено наличие значимой связи ($R^2 = 0.46$; p < 0.05) между величиной мощности теплоизлучения пожара и степенью пирогенной нарушенности растительного покрова на гарях, оцениваемой с помощью индекса dNBR. При этом связь между мощностью теплоизлучения и нарушенностью имеет нелинейный характер: для разных преобладающих пород рост значения FRP от 50 до 750 MBT/км² приводит к увеличению индекса dNBR на 43–55 %. В то же время дальнейшее возрастание FRP приводит к росту уровня нарушенности только на 7–11 %.

Показано наличие значимой связи между индексом dNBR и долей площади пожарного пикселя, в которой наблюдалась гибель древостоя. При этом, например, для пожарных пикселей, в которых значения индекса dNBR превышали 0,44, доля площади, на которой отмечалась гибель древостоя, была на $40-50\,\%$ выше по сравнению с пикселями, в которых dNBR был менее 0,44. При этом наибольший процент гибели древостоев наблюдался в лиственничных и темнохвойных лесах.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда, проект № 22-17-20012 (https://rscf.ru/project/22-17-20012/), при паритетной финансовой поддержке Правительства Республики Хакасии.

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. *Барталев С.А.*, *Егоров В.А.*, *Крылов А. М.*, *Стыценко Ф. В.*, *Ховратович Т. С.* Исследование возможностей оценки состояния повреждінных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 215—225.
- 3. *Барталев С.А.*, *Стыценко Ф. В.*, *Егоров В.А.*, *Лупян Е.А.* Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83—94.
- 4. 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.
- 5. *Буряк Л. В.*, *Сухинин А. И.*, *Каленская О. П.*, *Пономарев Е. И.* Последствия пожаров в ленточных борах юга Сибири // Сибирский эколог. журн. 2011. № 3. С. 331—339.
- 6. *Буряк Л. В.*, *Кукавская Е. А.*, *Каленская О. П.*, *Малых О. Ф.*, *Бакшеева Е. О.* Последствия лесных пожаров в южных и центральных районах Забайкальского края // Сибирский лесной журн. 2016. № 6. С. 94—102. https://doi.org/10.15372/SJFS20160609.
- 7. Леса России и изменение климата. Что нам может сказать наука / ред. Лескинен П., Линднер М., Веркерк П.-Й., Набуурс Г.-Я., ван Брусселен Й., Куликова Е., Хассегава М., Леринк Б. / Европейский институт леса. 2020. Т. 11. 142 с. https://doi.org/10.36333/wsctu11.
- 8. *Лупян Е.А.*, *Лозин Д. В.*, *Балашов И. В.*, *Барталев С.А.*, *Стыценко Ф. В.* 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. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.
- 9. *Пономарев Е. И.*, *Швецов Е. Г.*, *Харук В. И.* Пожары в Алтае-Саянском регионе: ландшафтно-экологическая приуроченность // Геофизические процессы и биосфера. 2015. Т. 14. № 4. С. 5–21.
- 10. 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. https://doi.org/10.7868/S0205961417040017.
- 11. *Швецов Е. Г.*, *Пономарев Е. И.* Оценка влияния внешних условий на мощность теплоизлучения от лесных пожаров по данным спутникового мониторинга // Сибирский эколог. журн. 2015. № 3. С. 413–421. https://doi.org/10.15372/SEJ20150308.
- 12. *Chu T.*, *Guo X.*, *Takeda K.* Effects of Burn Severity and Environmental Conditions on Post-Fire Regeneration in Siberian Larch Forest // Forests. 2017. V. 8(3). Art. No. 76. https://doi.org/10.3390/f8030076.
- 13. Delcourt C. J. F., Combee A., Izbicki B., Mack M. C., Maximov T., Petrov R., Rogers B. M., Scholten R. C., Shestakova 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. V. 13(12). Art. No. 2311. https://doi.org/10.3390/rs13122311.
- 14. French N. H. F., Kasischke E. S., Halle R. J., Murphy K. A., Verbyla D. L., Hoy E. E., Allen J. L. Using Landsat data to assess fire and burn severity in the North American boreal forest region: an overview and summary of results // Intern. J. Wildland Fire. 2008. V. 17. P. 443–462. https://doi.org/10.1071/WF08007.
- 15. *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.
- 16. Giglio L., Schroeder W. Hall J. V., Justice C. O. MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide. 2020.
- 17. 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. V. 342. P. 850–853. https://doi.org/10.1126/science.1244693.
- 18. *Keeley J. E.* Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage // Intern. J. Wildland Fire. 2009. V. 18. P. 116–126. https://doi.org/10.1071/WF07049.
- 19. *Kharuk V. I.*, *Ponomarev E. I.*, *Ivanova G. A.*, *Dvinskaya M. L.*, *Coogan S. C. P.*, *Flannigan M. D.* Wildfires in the Siberian taiga // Ambio. 2021. V. 50. P. 1953–1974. https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x.

- 20. *Key C. H.*, *Benson N. C.* Landscape Assessment (LA) Sampling and Analysis Methods. USDA Forest Service General Technical Report RMRS-GTR-164-CD. 2006. 55 p.
- 21. *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 // Environmental Research Letters. 2014. V. 9. Art. No. 105007. https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/105007.
- 22. *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 Ecology and Management. 2016. V. 382. P. 225–235. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.015.
- 23. *Ponomarev E. I.*, *Zabrodin A. N.*, *Ponomareva T. V.* Classification of Fire Damage to Boreal Forests of Siberia in 2021 Based on the dNBR Index // Fire. 2022. V. 5(19). https://doi.org/10.3390/fire5010019.
- 24. *Shvetsov E. G.*, *Kukavskaya E. A.*, *Buryak L. V.*, *Barrett K.* Assessment of post-fire vegetation recovery in Southern Siberia using remote sensing observations // Environmental Research Letters. 2019. V. 14. Art. No. 055001. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab083d.
- 25. Shvetsov E. G., Kukavskaya E. A., Shestakova T. A., Laflamme J., Rogers B. M. Increasing fire and log-ging disturbances in Siberian boreal forests: a case study of the Angara region // Environmental Research Letters. 2021. V. 16. Art. No. 115007. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2e37.
- 26. *Vermote E. F.* MOD09A1 MODIS Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500m SIN Grid. 2015. V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD09A1.006.
- 27. *Wooster M. J.* Small-scale experimental testing of fire radiative energy for quantifying mass combusted in natural vegetation fires // Geophysical Research Letters. 2002. V. 29(21). Art. No. 2027. https://doi.org/10.1029/2002GL015487.
- 28. *Wooster M. J.*, *Zhang Y. H.* Boreal forest fires burn less intensely in Russia than in North America // Geophysical Research Letters. 2004. V. 31. Art. No. L20505. https://doi.org/10.1029/2004GL020805.

Study of the influence of fire radiative power of forest fires on forest disturbance degree in southern regions of Central Siberia using satellite data

E. G. Shvetsov

Federal Research Center, Krasnoyarsk Science Center SB RAS Krasnoyarsk 660036, Russia Khakassian State University, Abakan 655017, Russia E-mail: eugeneshvetsov11@yandex.ru

Using MODIS data remotely sensed radiative power from forest fires was estimated and its effect on fire disturbance degree of the forest cover was analyzed. Large forest fires with the total burned area of 1500 hectares or more detected in the south of Central Siberia between 2001 and 2021 were analyzed. Using the satellite product of global forest cover change generated from Landsat data, the portion of fire pixel where forest mortality occurred was calculated. Fires in dark coniferous (*Pinus sibirica*, *Abies sibirica*) and larch-dominant (*Larix sibirica*) forests are characterized by higher (by about 25–30 %) values of fire radiative power compared to fires in deciduous (*Betula spp.*, *Populus tremula*) forests and pine-dominant (*Pinus silvestris*) forests. The significant correlation ($R^2 = 0.46$; p < 0.05) between the fire radiative power and the degree of pyrogenic disturbance of burned areas estimated using the dNBR index, was found. Significant relationship was also found between dNBR and the proportion of fire pixel, where post-fire forest mortality occurred.

Keywords: wildfires, remote sensing, MODIS, fire radiative power, vegetation indices, Siberia

Accepted: 23.09.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-136-146

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, *Lesovedenie*, 2021, Vol. 2, pp. 115–122 (in Russian), DOI: 10.31857/S0024114821020029.
- 2. Bartalev S. A., Egorov V. A., Krylov A. M., Stytsenko F. V., Khovratovich T. S., The evaluation of possibilities to assess forest burnt severity using multi-spectral satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 3, pp. 215–225 (in Russian).
- 3. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., Egorov V. A., Loupian E. A., Satellite-based assessment of Russian forest fire mortality, *Lesovedenie*, 2015, Vol. 2, pp. 83–94 (in Russian).
- 4. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S., Shabanov N., *Land cover mapping over Russia using Earth observation data*, Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
- 5. Buryak L.V., Sukhinin A.I., Kalenskaya O.P., Ponomarev E.I., Effects of fires in ribbon-like pine forests of southern Siberia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, Vol. 4(3), pp. 248–253, https://doi.org/10.1134/S1995425511030039.
- 6. Buryak L. V., Kukavskaya E. A., Kalenskaya O. P., Malykh O. F., Baksheeva E. O., Effects of forest fires in Southern and Central areas of the Zabaykal region, *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2016, Vol. 6, pp. 94–102 (in Russian), https://doi.org/10.15372/SJFS20160609.
- 7. Russian forests and climate change. What Science Can Tell Us 11, Leskinen P., Lindner M., Verkerk P.J., Nabuurs G.-J., Van Brusselen J., Kulikova E., Hassegawa M., Lerink B. (eds), European Forest Institute, 2020, Vol. 11, 140 p., https://doi.org/10.36333/wsctu11.
- 8. Loupian E. A., Lozin D. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Stytsenko F. V., 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), https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.
- 9. 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(7), pp. 725–736, https://doi.org/10.1134/S0001433816070069.
- 10. Ponomarev E. I., Shvetsov E. G., Usataya Yu. O., Registration of Wildfire Energy Characteristics in Siberian Forests Using Remote Sensing, *Isledovanie Zemli iz kosmosa*, 2017, No. 4, pp. 3–11 (in Russian), https://doi.org/10.7868/S0205961417040017.
- 11. 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(3), pp. 337–343, https://doi.org/10.1134/S1995425515030142.
- 12. Chu T., Guo X., Takeda K., Effects of Burn Severity and Environmental Conditions on Post-Fire Regeneration in Siberian Larch Forest, *Forests*, 2017, Vol. 8(76), https://doi.org/10.3390/f8030076.
- 13. Delcourt C.J. F., Combee A., Izbicki B., Mack M.C., Maximov T., Petrov R., Rogers B.M., Scholten R.C., Shestakova 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(12), Art. No. 2311, https://doi.org/10.3390/rs13122311.
- 14. French N. H. F., Kasischke E. S., Halle R. J., Murphy K. A., Verbyla D. L., Hoy E. E., Allen J. L., Using Landsat data to assess fire and burn severity in the North American boreal forest region: an overview and summary of results, *Intern. J. Wildland Fire*, 2008, Vol. 17, pp. 443–462, https://doi.org/10.1071/WF08007.
- 15. 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.
- 16. Giglio L., Schroeder W. Hall J. V., Justice C. O., MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide, 2020.
- 17. 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, pp. 850–853, https://doi.org/10.1126/science.1244693.
- 18. Keeley J. E., Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage, *Intern. J. Wildland Fire*, 2009, Vol. 18, pp. 116–126, https://doi.org/10.1071/WF07049.
- 19. Key C. H., Benson N. C., Landscape Assessment (LA) Sampling and Analysis Methods, USDA Forest Service General Technical Report RMRS-GTR-164-CD, 2006, 55 p.
- 20. Kharuk V. I., Ponomarev E. I., Ivanova G. A., Dvinskaya M. L., Coogan S. C. P., Flannigan M. D. Wildfires in the Siberian taiga, *Ambio*, 2021, Vol. 50, pp. 1953–1974, https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x.
- 21. 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, *Environmental Research Letters*, 2014, Vol. 9, Art. No. 105007, https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/105007.

- 22. 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 Ecology and Management*, 2016, Vol. 382, pp. 225–235, https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.015.
- 23. Ponomarev E. I., Zabrodin A. N., Ponomareva T. V., Classification of Fire Damage to Boreal Forests of Siberia in 2021 Based on the dNBR Index, *Fire*, 2022, Vol. 5(19), https://doi.org/10.3390/fire5010019.
- 24. Shvetsov E.G., Kukavskaya E.A., Buryak L.V., Barrett K., Assessment of post-fire vegetation recovery in Southern Siberia using remote sensing observations, *Environmental Research Letters*, 2019, Vol. 14, Art. No. 055001, https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab083d.
- 25. 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, *Environmental Research Letters*, 2021, Vol. 16, Art. No. 115007, https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2e37.
- 26. Vermote E. F., *MOD09A1 MODIS Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500m SIN Grid*, 2015, V006, NASA EOSDIS Land Processes DAAC, https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD09A1.006.
- 27. Wooster M.J., Small-scale experimental testing of fire radiative energy for quantifying mass combusted in natural vegetation fires, *Geophysical Research Letters*, 2002, Vol. 29(21), Art. No. 2027, https://doi.org/10.1029/2002GL015487.
- 28. Wooster M.J., Zhang Y.H., Boreal forest fires burn less intensely in Russia than in North America, *Geophysical Research Letters*, 2004, Vol. 31, Art. No. L20505, https://doi.org/10.1029/2004GL020805.