

Сопоставление оценок отпада древостоев Сибири после воздействия пожаров по дистанционным данным

Е. И. Пономарёв^{1,2}, Е. Г. Швецов^{1,3}

¹ *Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, 660036, Россия
E-mail: evg@ksc.krasn.ru*

² *Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, Россия*

³ *Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск, 660036, Россия*

Выполнено сопоставление оценок площадей породосменных пожаров на территории Сибири (в границах 50–75° с. ш., 60–160° в. д.). В анализе были использованы данные открытого каталога сервиса контроля потери древостоев GFC (*англ.* Global Forest Change) и материалы спутникового мониторинга пожаров на территории Сибири за период 2001–2023 гг. Сведения об отпаде древостоев детализированы с привязкой к доминирующим вариантам растительных покровов региона, включая лиственничные древостои, насаждения сосны, леса с преобладанием темнохвойных и лиственных пород. Сопряжённый анализ данных позволил выявить среднемноголетние значения фатального изменения растительных покровов, вызванного воздействием пожаров, доля которых составляла в различные годы от 20 до 90 % суммарных потерь древостоев, отражённых в материалах сервиса GFC для региона Сибири. Детализация степени пожарного воздействия на основные лесообразующие породы Сибири позволяет констатировать, что доля породосменных пожаров в общей статистике потерь светлохвойных древостоев по GFC варьирует на уровне 40–90 % площадей, для лесов с преобладанием темнохвойных, а также для лиственных лесов данная оценка ниже — до 20–40 %. Таким образом, показано, что из величины ежегодных потерь древостоев Сибири в размере 2,6 млн га пожары определяют до 1,9 млн га. На сопряжённых временных интервалах 2001–2012 и 2013–2023 гг. можно констатировать значимую прямую связь с достоверностью аппроксимации 0,95 (при уровне значимости $p < 0,01$) между площадями потерь древостоев по данным продукта GFC и ростом интенсивности пожаров Сибири.

Ключевые слова: лесные пожары, породосменные пожары, нарушенности растительного покрова, Сибирь

Одобрена к печати: 01.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-213-223

Введение

Нарушенность растительного покрова Сибири может быть вызвана широким спектром причин, но наиболее масштабными представляются последствия пожарного воздействия. Пожары Сибири определяют значимую часть нарушенности бореальных лесов не только в регионе, но и в планетарном масштабе. По данным инструментального спутникового мониторинга пожары в бореальных лесах криолитозоны Сибири приводят к нарушениям не менее 1 % лесопокрытой территории ежегодно (Пономарев, Пономарева, 2018). Пожарные режимы становятся дополнительным фактором, стимулирующим изменения растительных покровов, наряду с климатом (Williams et al., 2023). В целом природные причины деструктивных процессов в древостоях активно обсуждаются с точки зрения пожарного воздействия на растительность (Барталев, Стыщенко, 2021; Лупян и др., 2022; Ponomarev et al., 2022), наблюдаемых последствий масштабных вспышек численности фитофагов (Жиринов и др., 2016; Kovalev, Soukhovolsky, 2021) и ряда других, как правило, менее масштабных факторов (ветровалы, естественные усыхания) (Шихов и др., 2022).

Сегодня мониторинг таких последствий выполняется с использованием серий съёмок со спутниковых систем с последующим анализом спектральных признаков объектов исследования (Забродин, Пономарёв, 2023; Швецов, Пономарев, 2020; Krylov et al., 2014). Поэтому актуальна задача сопоставления результатов и изучения точности таких оценок без привле-

чения материалов наземных обследований, которые, как правило, носят эпизодический или точечный характер в силу высокой затратности натуральных работ.

Из современных публикаций известен ряд продуктов, в которых динамически обобщаются ежегодные изменения состояния растительных покровов. К таким относятся, например, ресурсы открытого каталога GLCLUC (*англ.* Global Land Cover and Land Use Change) (<https://glad.umd.edu/dataset/GLCLUC2020>) и материалы сервиса GFC (*англ.* Global Forest Change) (<https://glad.earthengine.app/view/global-forest-change>), сервис «Vegeta-Pro» (<http://pro-vega.ru/maps/>), оперативно отражающие нарушения древостоев, в том числе после пожаров, на картах растительного покрова (Барталев, Стыщенко, 2021; Hansen et al., 2013; Loupian et al., 2022; Potapov et al., 2022).

С учётом достаточно высокой степени современной обеспеченности информацией о площадях и характеристиках пожаров можно предполагать, что точность оценок послепожарного отпада древостоев имеет тенденцию к повышению с развитием спутниковых методов. Однако возможны расхождения, связанные с учётом или неучётом всего комплекса факторов, оказывающих негативное воздействие на древостои, в суммарной статистике потерь лесов. Такие невязки, прежде всего, могут быть нивелированы посредством сопряжения пространственных данных о нарушении растительного покрова региона с фактическими полигонами пожаров. В рамках этой гипотезы в данном исследовании выполнено сопоставление сведений об отпаде древостоев Сибири на современном временном интервале 2001–2023 гг. с фактическими данными о пожарах в целях количественного описания уровня невязок в данных продукта GFC для различных доминирующих древостоев региона.

Представлены результаты по следующим вопросам: 1) средние многолетние значения распределения пожаров по доминирующим древостоям Сибири; 2) динамика доли породосменных пожаров для основных вариантов растительного покрова; 3) оценка доли породосменных пожаров в общей площади потерь растительности по данным продукта GFC.

Исходные данные и методы обработки

Исследования были выполнены для территории Сибири (50–75° с. ш., 60–160° в. д.) общей площадью ~950 млн га (*рис. 1*, см. с. 215). Здесь на большей части (270–300 млн га) доминируют лиственничные (*Larix sibirica*, *L. gmelinii*) леса и редколесья. Сосновые насаждения (*Pinus sylvestris*) представлены на площади до 95 млн га, темнохвойные (*Pinus sibirica*, *Abies sibirica*, *Picea obovata*) занимают до 75 млн га, на лиственные (*Populus tremula*, *Betula spp.*) и на долю смешанных лесов приходится до 77 млн га. На значительной части (~200 млн га) территории Сибири распространена характерная тундровая растительность (*Pinus pumila*, *Betula nana*, *Salix spp.*).

В работе были использованы инструментальные данные наблюдения пожаров растительности Сибири, полученные в Институте леса (ИЛ СО РАН) и Федеральном исследовательском центре «Красноярский научный центр СО РАН» (ФИЦ КНЦ СО РАН) (Красноярск, Россия) для зафиксированных спутниковыми средствами пожаров (Пономарев, Швецов, 2015). Исходные сведения о пожарах Сибири за период 1996–2023 гг. содержат более $7 \cdot 10^6$ записей, представленных в формате векторных полигональных покрытий с расширенным набором атрибутивной информации о каждом полигоне пожара, которые характеризуют современный уровень горимости Сибири (Пономарёв, 2024).

Подход, использованный при наполнении базы данных пожаров, основан на агрегации пикселей с активными очагами горения, фиксируемых по данным MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (стандартный продукт MOD14/MYD14). Стандартный продукт активных пожаров MODIS содержит географические координаты только для центра «пожарного пикселя», в связи с этим для расчёта координат углов пикселей используется стандартный продукт геолокации (MOD03/MYD03). Агрегация полигонов пожарных пикселей в итоговые полигоны пожаров выполняется с применением заданных порогов пространственной (L) и временной (T) невязки (Пономарев, Швецов, 2015). Для пожаров,

обнаруженных весной и осенью, используется пространственный ($L = 1$ км) и временной ($T = 24$ ч) порог агрегации. Для летних пожаров — пороговые значения $L = 3$ км и $T = 6$ сут. Соответствующие параметры агрегации были получены из предварительного набора тестов с использованием различных пространственно-временных комбинаций и периметров пожаров, уточнённых по данным съёмки спутника Landsat, включая применение поправочных коэффициентов для учёта завышения площадей, связанных с низким разрешением продуктов MODIS (Пономарев, Швецов, 2015).

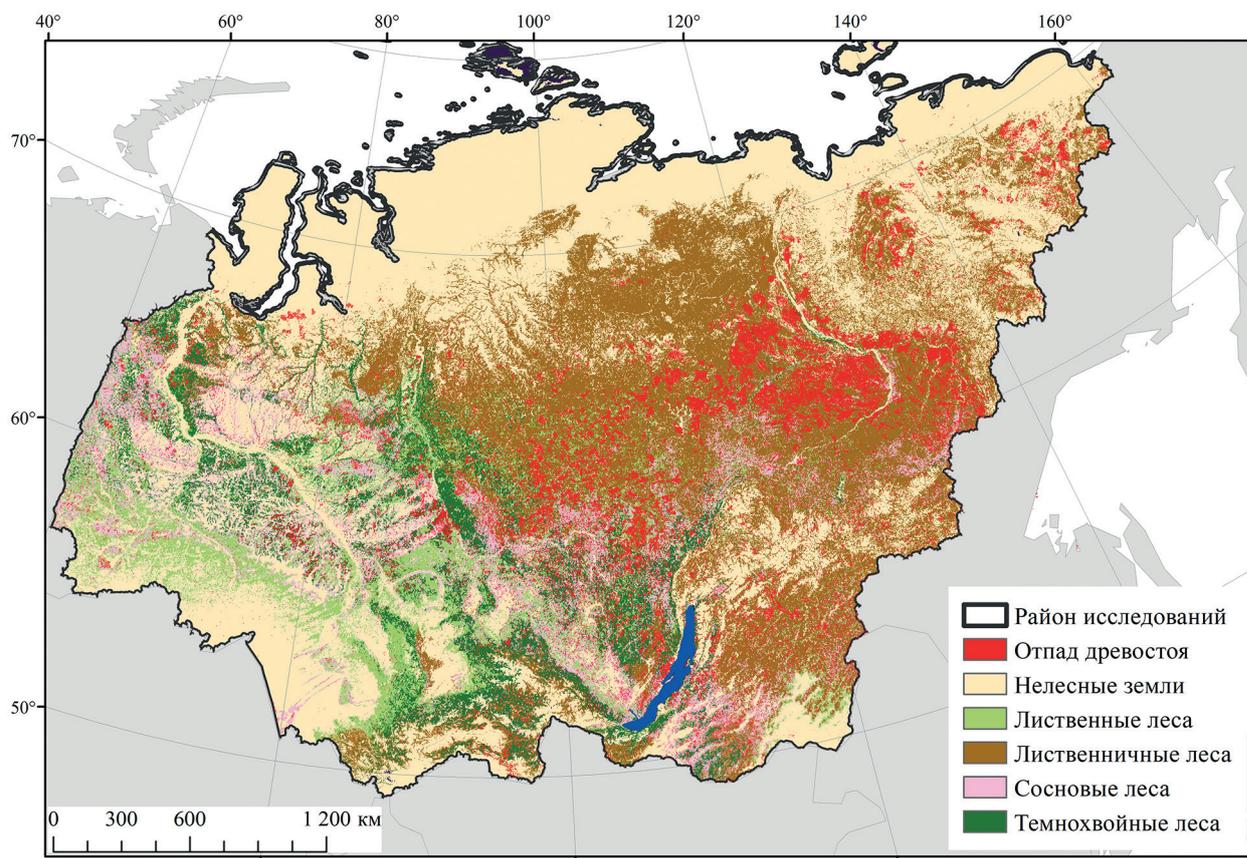


Рис. 1. Район исследования в границах территории Сибири. Растительный покров показан по данным сервиса «Вега-Про» (<http://pro-vega.ru/maps/>) (Loupian et al., 2022). Потери лесного покрова за период 2001–2023 гг. отмечены по материалам Global Forest Change (<https://glad.earthengine.app/view/global-forest-change>) (Hansen et al., 2013)

Общий объём использованной в работе выборки составил 381 694 полигона пожаров за 2001–2023 гг., в среднем — $16\,595 \pm 4820$ пожарных полигонов в год.

Доминирующие варианты древостоев определялись с использованием данных информационного ресурса «Вега-Про» (Институт космических исследований РАН) (Барталев и др., 2016; Loupian et al., 2022). Материалы портала обновляются по данным обработки спутниковой съёмки Terra/Aqua MODIS. Пространственное разрешение используемых каналов приведено к 230 м. Таким образом, при сопряжённом анализе данных о пожарах и растительности выполняется требование заданного уровня точности.

Обработка пространственно-временного пересечения слоя «пожары» и слоя «растительность» выполнялась с применением стандартных возможностей открытого пакета QGIS (англ. Quantum Geographic Information System, <https://www.qgis.org/>) версии 3.16.3, процедур пространственного пересечения векторных полигональных и растровых слоёв и вычисления пространственной статистики.

Для выявления участков потерь лесного покрова использовались материалы сервиса GFC (Hansen et al., 2013; Potarov et al., 2022) версии 1.11, находящегося в открытом доступе (см. *рис. 1*). 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 потери) лесного покрова с периодичностью один год с 2001 по 2023 г. (Potarov et al., 2022). Согласно приводимым оценкам авторов продукта (Hansen et al., 2013) точность фиксируемых потерь лесов составляет 88 % в случае бореальных лесов. Исследования, проведённые для других лесорастительных условий, показали точность продукта на уровне 75–94 % (Galiatsatos et al., 2020; Sari et al., 2021).

Процедура выделения породосменных пожаров состояла из трёх этапов. На первом этапе для упрощения совместной обработки продукта изменения лесного покрова и базы данных пожаров проводилась процедура растеризации геоинформационных слоёв пожаров за каждый год. Пространственное разрешение и система координат итоговых пожарных растров были приведены в соответствие с параметрами продукта изменения лесного покрова GFC (система координат WGS1984 (*англ.* World Geodetic System 1984), пространственное разрешение 0,00025°). На втором этапе полигоны лесных пожаров были сопряжены с вариантом преобладающего древостоя, при этом пожары на нелесных землях из рассмотрения исключались. На третьем этапе выполнялась категоризация всех рассмотренных пожарных пикселей на классы «породосменный пожар» или «непородосменный пожар» в сопряжении с растровым слоем данных сервиса GFC.

Поскольку послепожарный отпад древостоя следует контролировать в течение нескольких лет после пирогенного воздействия, в работе использовался временной порог три года, который применялся для условий Сибири ранее (Krylov et al., 2014). Далее выполнялись процедуры подсчёта пространственной статистики и оценки доли площади потерь лесов региона, связанных с воздействием пожаров на рассматриваемом временном интервале 2001–2023 гг., на фоне общей статистики сервиса GFC.

Результаты и обсуждение

На *рис. 2* приведена статистика потерь древостоев в Сибири, отражённых в продукте GFC. Согласно этим данным ежегодная площадь потерь лесов в регионе превышает 2,6 млн га/год, характеризуясь значительной дисперсией (стандартное отклонение $\sigma = 1,6$ млн га/год), которая отражает значительную межсезонную вариативность площадей пожаров на рассматриваемом временном интервале.

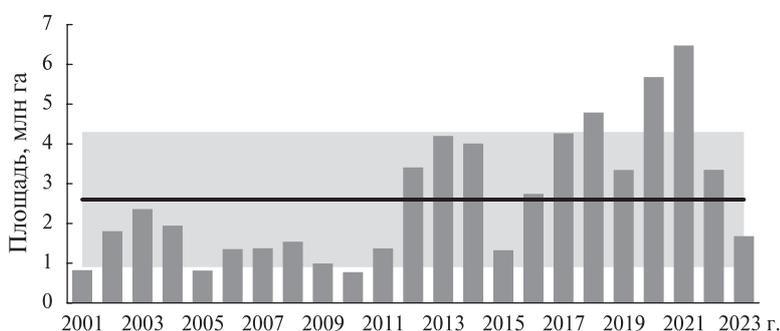


Рис. 2. Площадь потерь растительных покровов на территории Сибири по данным продукта Global Forest Change на интервале 2001–2023 гг. Чёрной линией обозначено среднее значение, светло-серая область соответствует ± 1 стандартному отклонению

Обобщение инструментальных данных о пожарах также констатирует значительную межсезонную вариативность уровня пожарного воздействия применительно к вариантам доми-

нирующих древостоев. Наибольший уровень пожарного воздействия — до 60 % ежегодной площади пожаров — приходится на лиственничные древостои и редколесья. Обобщённая характеристика средних многолетних показателей горимости за период спутниковых наблюдений приведена в *табл. 1*. Следует отметить, что учитываемая в данном анализе ежегодная площадь только пожаров в лесах превышает 5,5 млн га/год, что не менее чем вдвое выше среднемноголетнего значения потерь древостоев региона в статистике GFC (см. *рис. 2*).

Таблица 1. Обобщённая характеристика горимости доминирующих вариантов растительного покрова Сибири на временном интервале 1996–2021 гг.

Доминирующий древостой	Доля пожаров, %	Доля площади пожаров, %	Средняя площадь S, млн га/год
Лиственница (<i>Larix sibirica</i> , <i>L. gmelinii</i>)	43,2	60,3	2,48
Лиственничные редколесья (<i>Larix sibirica</i> , <i>L. cajanderi</i>)			0,82
Сосна (<i>Pinus sylvestris</i>)	26,4	16,9	0,92
Лиственные (<i>Populus tremula</i> , <i>Betula spp.</i>)	20,6	13,2	0,76
Темнохвойные (<i>Pinus sibirica</i> , <i>Abies sibirica</i> , <i>Picea obovata</i>)	7,0	6,4	0,37
Лесотундра (<i>Pinus pumila</i>)/тундровая растительность	2,8	3,2	0,20

На интервале 2001–2023 гг. для всех рассмотренных вариантов растительного покрова (*табл. 2*) стандартное отклонение (σ) для средней многолетней площади пожаров сопоставимо со значением анализируемого параметра. При этом по отношению к периоду рубежа XX–XXI вв. можно отметить тенденцию роста площади пожарного воздействия (*табл. 1* и *2*) во всех рассматриваемых вариантах растительности Сибири.

В светлохвойных лесах Сибири доля породосменных пожаров при этом сопровождается кратным повышением с 2010-х гг. по отношению к оценкам, полученным для периода 2001–2010 гг. (*табл. 2*).

Таблица 2. Среднее значение площади пожарных повреждений с выделением доли породосменных пожаров в привязке к преобладающим древостоям Сибири за 2001–2023 гг. по материалам GFC. Стандартное отклонение (σ) приводится в скобках

Период	Площадь пожаров, тыс. га				Площадь породосменных пожаров, тыс. га			
	Темнохвойные	Лиственничники	Сосняки	Лиственные	Темнохвойные	Лиственничники	Сосняки	Лиственные
2001–2005	118,4 (92,5)	2764,3 (2272,5)	862,9 (791,0)	580,9 (417,0)	23,9 (33,0)	656,1 (703,3)	146,6 (127,0)	17,0 (12,0)
2006–2010	144,3 (84,4)	1478,4 (845,5)	795,8 (376,6)	1202,1 (437,0)	24,8 (21,7)	356,8 (247,4)	118,4 (41,5)	18,9 (8,0)
2011–2015	671,6 (565,6)	4299,2 (1444,4)	1674,9 (1128,9)	1557,2 (897,5)	301,6 (272,2)	1477,5 (771,1)	465,6 (501,6)	75,7 (108,4)
2016–2020	518,6 (236,5)	5159,4 (1500,1)	939,5 (137,9)	833,3 (303,8)	274,9 (134,3)	2667,5 (782,2)	333,3 (87,8)	65,5 (29,1)
2021–2023	311,3 (85,1)	4038,5 (3637,4)	984,3 (271,7)	2413,3 (249,7)	128,3 (67,1)	2085,7 (2253,1)	313,6 (217,8)	58,5 (29,4)
Среднее	356,5 (351,8)	3505,3 (2495,2)	1057,3 (773,8)	1221,6 (763,2)	152,6 (182,9)	1393,3 (1365,3)	272,3 (270,6)	46,1 (55,4)

Имеющееся расхождение данных о средних площадях пожаров за период 1996–2021 гг. (*табл. 1*) и 2001–2023 гг. (*табл. 2*) для категории темнохвойных и лиственных лесов, с одной стороны, может быть вызвано значимым трендом повышения горимости в Сибири в начале

XXI в. С другой стороны, такие расхождения закономерно определяются невязками, сопровождающими различные подходы к классификации потерь древостоев по материалам спутниковых съёмки разного пространственного разрешения.

Так, установлено, что в сравнении со стандартным продуктом гарей MODIS (MCD64A1) (Giglio et al., 2018) продукты, основанные на агрегации очагов активного горения (термоточек), превышают площади пожаров в хвойных вечнозелёных и лиственных лесах (Roy et al., 2008), преобладающих в исследуемом регионе. Кроме того, для условий Сибири характерно преобладание низовых пожаров низкой и средней интенсивности, которые могут быть пропущены алгоритмом на основе спектральных изменений (стандартный продукт гарей), но эффективно регистрируются пороговыми методами (Rogers et al., 2015).

Площади для категорий пожаров в лиственных лесах с учётом редколесий севера ($S \sim 3,5$ млн га) и в сосняках ($S \sim 1,0$ га) получились сопоставимыми (табл. 1 и 2), невязка между данными двух сроков наблюдений не превышает 7–10 %.

Общие закономерности соотношения площадей пожаров, доли породосменных пожаров и площади потерь древостоев по GFC отражены на рис. 3.

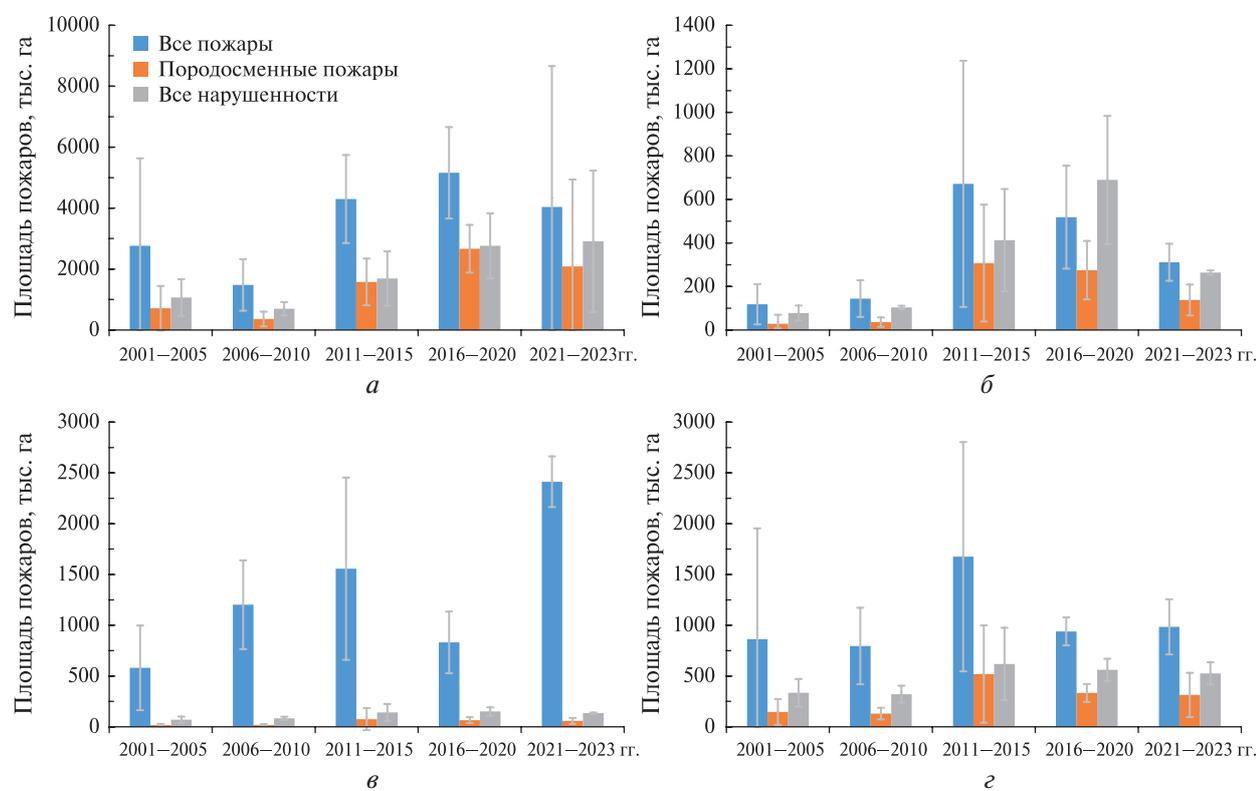


Рис. 3. Динамика площадей пожаров и доли породосменных пожаров в лесах Сибири с преобладанием насаждений: а — лиственных; б — темнохвойных; в — лиственных; г — сосновых. Планки погрешности соответствуют стандартному отклонению σ

Как показывает анализ материалов по теме, уровень отпада древостоев по оценкам, выполняемым с применением спектральных индексов и данных об энергетических характеристиках пожаров, также сопоставим с приводимыми в сервисе GFC. Так, для сезона 2021 г. на основе анализа пожарного индекса dNBR (англ. Differenced Normalized Burn Ratio) площадь наибольшего пожарного поражения с вероятным отпадом древостоев в Сибири была оценена в 2,5 млн га (Ponomarev et al., 2022). Эта величина укладывается в средние многолетние значения GFC и соответствует иным данным (Барталев, Стыценко, 2021; Лупян и др., 2022).

При этом сопряжённый анализ потерь древостоев по GFC с фактическими данными о пожарах на территории Сибири позволяет отметить общую тенденцию завышения потерь

лесов (см. рис. 3), вероятно, связанную с учётом отпада в результате иных факторов воздействия на древостои. Значимость иных факторов, определяющих статистику отпада древостоев, по нашему мнению, представляет самостоятельную задачу исследования и не обсуждается в данной статье. Можно констатировать, что доля площадей пожаров, приводящих к последующему отпаду древостоев, варьирует на уровне 15–50 % и имеет значимый тренд линейного роста (достоверность R^2 изменяется в диапазоне 0,68–0,88 для уровня значимости $p < 0,05$) на рассматриваемом интервале (рис. 4а). В то же время в общей статистике потерь светлохвойных древостоев по GFC пожарная составляющая варьирует на уровне 40–90 % площадей (рис. 4б), для лесов с преобладанием темнохвойных диапазон изменения показателя составляет от 30 до 40 %, для лиственных — до 20–40 %. В отсутствие иных масштабных факторов деградации лесов пожарная составляющая доминирует (90 % всех отпадов).

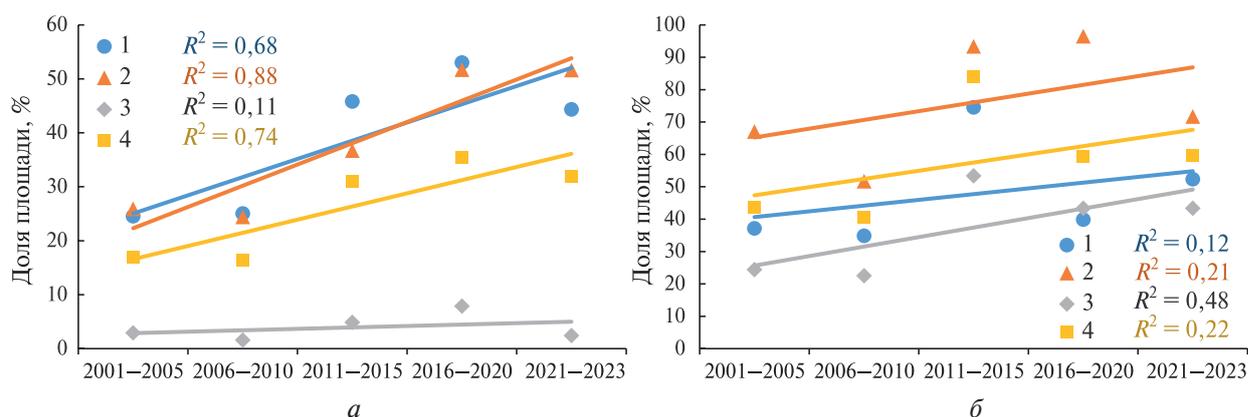


Рис. 4. Обобщённая по 5-летним временным интервалам статистика, динамика доли площади породосменных пожаров относительно общей площади: а — пожаров; б — отпада древостоев, вызванного всеми факторами. Данные для преобладающих древостоев: 1 — темнохвойные леса, 2 — лиственничные леса, 3 — лиственные леса, 4 — сосновые леса

В среднем за рассмотренный период для Сибири сведения GFC позволяют говорить о >40 % породосменных пожаров в год в темнохвойных насаждениях, до 40 % — в лиственничниках, на уровне 25 % — в условиях преобладания сосны и <5 % — в лиственных лесах (рис. 5).

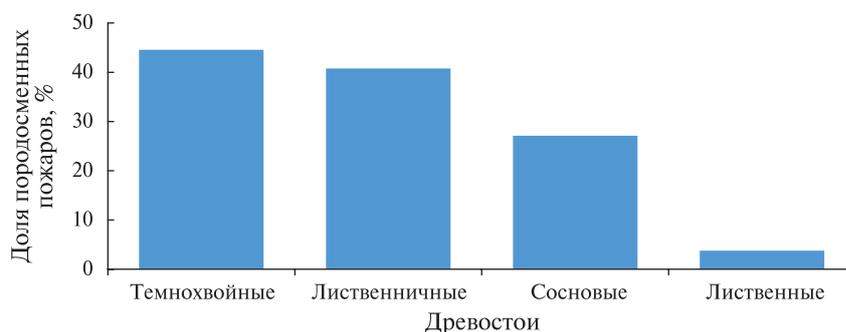


Рис. 5. Доли породосменных пожаров в ежегодной площади пожарного воздействия для преобладающих древостоев Сибири

Сопоставляя статистику по GFC (см. рис. 4) и данные фактического мониторинга пожаров, следует учитывать как возможность попадания «пожарных пикселей» за пределы полигонов GFC (вероятные ошибки первого рода), так и возможность отсутствия класса «потеря древостоя» по GFC в границах отдельных участков пожаров (ошибки второго рода).

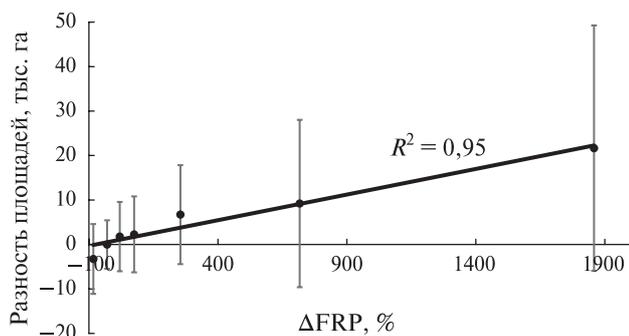


Рис. 6. Диаграмма зависимости разности площадей породосменных пожаров по GFC на сопряжённых временных интервалах 2001–2012 и 2013–2023 гг. от относительного изменения радиационной мощности пожаров в Сибири

2022). При этом в процентном отношении доля породосменных пожаров Сибири оценивается величиной 30 % (Krylov et al., 2014), а с учётом детализации по древостоям — составляет от 10 % в сосновых древостоях до 34 % в темнохвойных и лиственных насаждениях (Ponomarev et al., 2022).

Ранее в работе (Ponomarev et al., 2023) было показано, что в Сибири растёт интенсивность пожаров, оценённая в терминах мощности теплоизлучения по методике FRP (*англ.* Fire Radiative Power). Положительный тренд интенсивности характерен для ~30 % общей площади региона. Основываясь на этом, мы дополнительно рассмотрели данные GFC относительно пространственного распределения динамики интенсивности пожаров. На сопряжённых временных интервалах 2001–2012 и 2013–2023 гг. можно констатировать значимую линейную связь ($R^2 = 0,95$, $p < 0,01$) между потерями древостоев и ростом интенсивности пожаров (рис. 6). Этот факт дополнительно объясняет положительный тренд потерь древостоев, фиксируемых GFC, в частности, от пожаров с начала XXI в.

Заключение

На современном временном интервале 2001–2023 гг. среднеголетние значения фатального изменения растительных покровов Сибири, вызванного воздействием пожаров, составили в различные годы от 20 до 90 % суммарных потерь древостоев, отражённых в материалах сервиса Global Forest Change (GFC).

В статистике потерь светлохвойных древостоев по GFC пожары определяют 40–90 % площадей; в лесах с преобладанием темнохвойных, а также в лиственных лесах уровень послепожарной гибели достигает 20–40 %.

Оценка ежегодной площади потерь лесов в регионе составила $2,6 \pm 1,7$ млн га. Из этого числа на фоне присутствия влияния иных факторов пожары являются ежегодной причиной потерь до $1,9 \pm 1,6$ млн га лесных площадей в Сибири. Эта величина укладывается в диапазон, приводимый другими авторами. При этом расхождения закономерно определяются невязками, сопровождающими различные подходы классификации потерь древостоев по материалам спутниковых съёмок разного пространственного разрешения, также как и принципиальными различиями между алгоритмами на основе спектральных изменений (стандартный продукт гарей) и пороговыми методами регистрации активных пикселей пожаров.

Отмечен стабильный тренд роста породосменных пожаров с начала XXI в. Одной из причин, сопряжённой с климатическими изменениями в регионе, является увеличение интенсивности пожаров. На сопряжённых временных интервалах 2001–2012 и 2013–2023 гг. зафиксирована значимая (для уровня значимости $p < 0,01$) прямая связь (достоверность аппроксимации $R^2 = 0,95$) между площадью потерь древостоев по данным продукта GFC и ростом интенсивности пожаров Сибири.

Работа выполнена в рамках государственного задания № FWES-2024-0023 (ИЛ СО РАН) и FWES-2024-0027 (ФИЦ КНЦ СО РАН). Материалы спутникового мониторинга получены и обработаны в Центре коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

Литература

1. *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.
2. *Барталев С. А., Стыценок 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.
3. *Жирин В. М., Князева С. В., Эйдлина С. П.* Многолетняя динамика вегетационных индексов темнохвойных лесов после повреждения Сибирским шелкопрядом // *Лесоведение*. 2016. № 1. С. 3–14.
4. *Забродин А. Н., Пономарёв Е. И.* Оценка связи между степенью пожарного воздействия на растительность и мощностью теплоизлучения от пожара // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 5. С. 166–175. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-166-175.
5. *Лупян Е. А., Лозин Д. В., Балашов И. В. и др.* Исследование зависимости степени повреждений лесов пожарами от интенсивности горения по данным спутникового мониторинга // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. № 3. С. 217–232. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.
6. *Пономарёв Е. И.* Пространственно-временное распределение показателей горимости растительности Сибири за период спутниковых наблюдений 1996–2023 гг. в формате векторного полигонального слоя. Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2024622955. Рег. 05.07.2024.
7. *Пономарев Е. И., Пономарева Т. В.* Влияние послепожарных температурных аномалий на сезонное протаивание почв мерзлотной зоны Средней Сибири по дистанционным данным // *Сибирский эколог. журн.* 2018. № 4. С. 479–488. DOI: 10.15372/SEJ20180408.
8. *Пономарев Е. И., Швецов Е. Г.* Спутниковое детектирование лесных пожаров и геоинформационные методы калибровки результатов // *Исслед. Земли из космоса*. 2015. № 1. С. 84–91. DOI: 10.7868/S0205961415010054.
9. *Швецов Е. Г., Пономарев Е. И.* Послепожарные эффекты в лиственничниках Сибири на много-спектральных спутниковых данных // *Сибирский эколог. журн.* 2020. № 1. С. 129–140. <https://doi.org/10.15372/SEJ20200110>.
10. *Шихов А. Н., Чернокульский А. В., Ажигов И. О.* Пространственно-временное распределение ветровалов в лесной зоне Западной Сибири в 2001–2020 гг. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. № 3. С. 186–202. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-186-202.
11. *Galiatsatos N., Donoghue D. N. M., Watt P. et al.* An assessment of global forest change datasets for national forest monitoring and reporting // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. Iss. 11. Article 1790. DOI: 10.3390/rs12111790.
12. *Giglio L., Boschetti L., Roy D. et al.* The collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 217. P. 72–85. DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.005.
13. *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.
14. *Kovalev A., Soukhovolsky V.* Analysis of forest stand resistance to insect attack according to remote sensing data // *Forests*. 2021. V. 12. Article 1188. DOI: 10.3390/f12091188.
15. *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. Article 105007. 8 p. DOI: 10.1088/1748-9326/9/10/105007.
16. *Loupian E. A., Bourtsev M. A., Proshin A. A. et al.* Usage experience and capabilities of the VEGA-Science system // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. Iss. 1. Article 77. DOI: 10.3390/rs14010077.
17. *Ponomarev E., Zabrodin A., Ponomareva T.* Classification of fire damage to boreal forests of Siberia in 2021 based on the dNBR index // *Fire*. 2022. V. 5. No. 1. Article 19. DOI: 10.3390/fire5010019.
18. *Ponomarev E. I., Zabrodin A. N., Shvetsov E. G., Ponomareva T. V.* Wildfire intensity and fire emissions in Siberia // *Fire*. 2023. V. 6. No. 7. Article 246. DOI: 10.3390/fire6070246.
19. *Potapov P., Hansen M. C., Pickens A. et al.* The global 2000–2020 land cover and land use change dataset derived from the Landsat archive: first results // *Frontiers in Remote Sensing*. 2022. V. 3. Article 856903. DOI: 10.3389/frsen.2022.856903.
20. *Rogers B. M., Soja A. J., Goulden M. L., Randerson J. T.* Influence of tree species on continental differences in boreal fires and climate feedbacks // *Nature Geoscience*. 2015. V. 8. No. 3. Article 228. <https://doi.org/10.1038/ngeo2352>.
21. *Roy D. P., Boschetti L., Justice C. O., Ju J.* The collection 5 MODIS burned area product — Global evaluation by comparison with the MODIS active fire product // *Remote Sensing of Environment*. 2008. V. 112. No. 9. P. 3690–3707. DOI: 10.1016/j.rse.2008.05.013.

22. Sari I. L., Weston C. J., Newnham G. J., Volkova L. Assessing accuracy of land cover change maps derived from automated digital processing and visual interpretation in tropical forests in Indonesia // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. Iss. 8. Article 1446. DOI: 10.3390/rs13081446.
23. Williams N. G., Lucash M. S., Ouellette M. R. et al. Simulating dynamic fire regime and vegetation change in a warming Siberia // *Fire ecology*. 2023. V. 19. No. 33. DOI: 10.1186/s42408-023-00188-1.

Comparison of estimates of post-fire forest mortality in Siberia based on remote sensing data

E. I. Ponomarev^{1,2}, E. G. Shvetsov^{1,3}

¹ *Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia*
E-mail: evg@ksc.krasn.ru

² *Siberian Federal University, Krasnoyarsk 660041, Russia*

³ *Krasnoyarsk Science Center SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia*

We estimated forest areas experienced stand replacement fires in Siberia (between 50–75° N and 60–160° E). We used data on tree cover loss from the Global Forest Change (GFC) dataset and satellite data on burned areas in Siberia for the period 2001–2023. Tree cover loss was estimated for dominant tree species in the region, including larch stands, pine stands, dark coniferous and deciduous forests. Joint analysis allowed us to identify mean long-term proportion of fire-caused tree cover loss that varied between 20 and 90 % of the total tree cover loss reported by GFC for the Siberian region. Analysis of fire impact considering dominant tree species in Siberia showed that the proportion of stand replacement fires in light coniferous forests according to GFC varies between 40–90 % of the total area experienced tree cover loss; for dark coniferous and deciduous forests, this proportion was lower — between 20 and 40 %. It was shown that fires were responsible for 1.9 million hectares of tree cover loss of the total tree cover loss area of 2.6 million hectares. We also found a significant linear relationship with approximation reliability of 0.95 (level of significance $p < 0.01$) between the tree cover loss areas according to GFC product and the increase in the intensity of fires in Siberia in time periods of 2001–2012 and 2013–2023.

Keywords: forest fires, stand replacement fires, disturbance of vegetation cover, Siberia

Accepted: 01.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-213-223

References

1. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe katrographirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAS, 2016, 208 p. (in Russian).
2. 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.
3. Zhirin V. M., Knyazeva S. V., Eydlina S. P., Long-term dynamics of vegetation indices in dark coniferous forest after Siberian moth disturbance, *Contemporary Problems of Ecology*, 2016, Vol. 9, No. 7, pp. 834–842, DOI: 10.1134/S1995425516070118.
4. Zabrodin A. N., Ponomarev E. I., Dependence assessment between the degree of fire impact on vegetation and the fire radiative power, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 5, pp. 166–175 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-166-175.
5. Loupian E. A., Lozin D. V., Balashov I. V. et al., Study of the dependence of forest fire damage degree on burning intensity based on satellite monitoring data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 3, pp. 217–232 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.

6. Ponomarev E. I., *Prostranstvenno-vremennoe raspredelenie pokazatelei gorimosti rastitel'nosti Sibiri za period sputnikovykh nablyudenii 1996–2023 gg. v formate vektornogo poligonal'nogo sloya* (Spatiotemporal distribution of vegetation burning indicators in Siberia for the period of satellite observations 1996–2023 in the format of a vector polygonal layer), Certificate of state registration of database No. 2024622955 (RU), Reg. 05.07.2024 (in Russian).
7. Ponomarev E. I., Ponomareva T. V., The effect of postfire temperature anomalies on seasonal soil thawing in the permafrost zone of Central Siberia evaluated using remote data, *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, Vol. 11, No. 4, pp. 420–427, DOI: 10.1134/S1995425518040066.
8. Ponomarev E. I., Shvetsov E. G., Satellite detection of forest fires and geoinformation methods for calibrating of the result, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 1, pp. 84–91 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961415010054.
9. Shvetsov E. G., Ponomarev E. I., Postfire effects in Siberian larch stands on multispectral satellite data, *Contemporary Problems of Ecology*, 2020, Vol. 13, No. 1, pp. 104–112, DOI: 10.1134/S1995425520010096.
10. Shikhov A. N., Chernokulsky A. V., Azhigov I. O., Spatio-temporal distribution and origins of windthrow events in the forest zone of Western Siberia in 2001–2020, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 3, pp. 186–202 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-186-202.
11. Galiatsatos N., Donoghue D. N. M., Watt P. et al., An assessment of global forest change datasets for national forest monitoring and reporting, *Remote Sensing*, 2020, No. 12, Iss. 11, Article 1790, DOI: 10.3390/rs12111790.
12. Giglio L., Boschetti L., Roy D. et al., The collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 217, pp. 72–85, DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.005.
13. Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R. et al., High-resolution global maps of 21st century forest cover change, *Science*, 2013, Vol. 342, pp. 850–853, DOI: 10.1126/science.1244693.
14. Kovalev A., Soukhovolsky V., Analysis of forest stand resistance to insect attack according to remote sensing data, *Forests*, 2021, Vol. 12, Article 1188, DOI: 10.3390/f12091188.
15. 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, Article 105007, 8 p., DOI: 10.1088/1748-9326/9/10/105007.
16. Loupian E. A., Bourtsev M. A., Proshin A. A. et al., Usage experience and capabilities of the VEGA-Science system, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, Iss. 1, Article 77, DOI: 10.3390/rs14010077.
17. 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, No. 1, Article 19, DOI: 10.3390/fire5010019.
18. Ponomarev E. I., Zabrodin A. N., Shvetsov E. G., Ponomareva T. V., Wildfire intensity and fire emissions in Siberia, *Fire*, 2023, Vol. 6, No. 7, Article 246, DOI: 10.3390/fire6070246.
19. Potapov P., Hansen M. C., Pickens A. et al., The global 2000–2020 land cover and land use change dataset derived from the Landsat archive: first results, *Frontiers in Remote Sensing*, 2022, Vol. 3, Article 856903, DOI: 10.3389/frsen.2022.856903.
20. Rogers B. M., Soja A. J., Goulden M. L., Randerson J. T., Influence of tree species on continental differences in boreal fires and climate feedbacks, *Nature Geoscience*, 2015, Vol. 8, No. 3, Article 228, DOI: 10.1038/ngeo2352.
21. Roy D. P., Boschetti L., Justice C. O., Ju J., The collection 5 MODIS burned area product — Global evaluation by comparison with the MODIS active fire product, *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, No. 9, pp. 3690–3707, DOI: 10.1016/j.rse.2008.05.013.
22. Sari I. L., Weston C. J., Newnham G. J., Volkova L., Assessing accuracy of land cover change maps derived from automated digital processing and visual interpretation in tropical forests in Indonesia, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, Iss. 8, Article 1446, DOI: 10.3390/rs13081446.
23. Williams N. G., Lucash M. S., Ouellette M. R. et al., Simulating dynamic fire regime and vegetation change in a warming Siberia, *Fire ecology*, 2023, Vol. 19, No. 33, DOI: 10.1186/s42408-023-00188-1.