

Оценка степени нарушенности лесов юга средней Сибири пожарами и послепожарной динамики по спутниковым данным

Е.Г. Швецов^{1,2*}

¹ Хакасский государственный университет, Абакан, 655017, Россия

² Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, обособленное подразделение
ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, 660036

Задачи исследования

Основной целью данной работы был анализ степени пирогенной нарушенности и послепожарной динамики нормализованного индекса гарей (NBR) на юге Средней Сибири.

Рассматривались следующие аспекты:

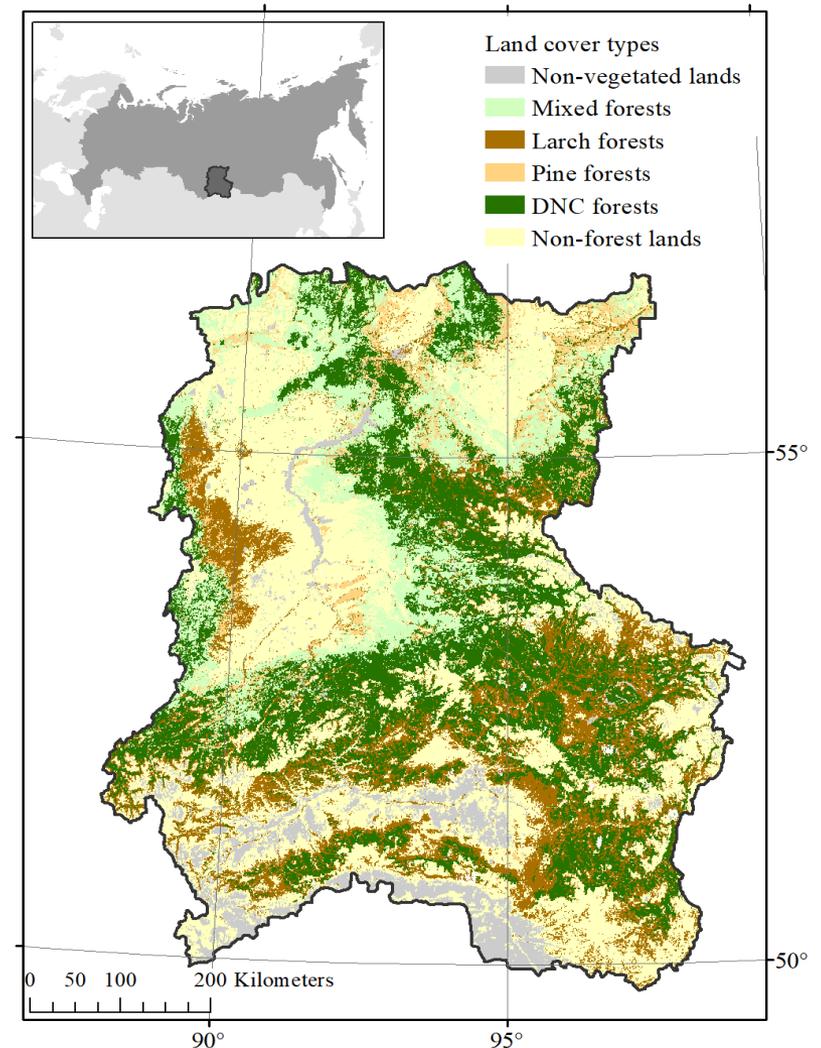
1. Какова сезонная и годовая динамика площади гарей;
2. Какова связь между радиационной мощностью пожара (FRP) и степенью пирогенной нарушенности растительности, оцениваемой с помощью индекса dNBR;
3. Какова доля гарей с разным уровнем послепожарного отпада древостоев;
4. Динамика нормализованного индекса гарей (NBR) на территориях, пройденных огнём;
5. Время, необходимое для достижения нормализованным индексом гарей допожарных значений.

Район исследований

Территория исследований включала южные районы Красноярского края, территорию республик Хакасия и Тыва: 50–56° с.ш. и 88–99° в.д.

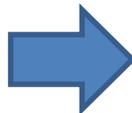
Площадь около $4,1 \times 10^5$ км²

- темнохвойные леса: кедр (*Pinus sibirica*) и пихта (*Abies sibirica*) (25%);
- лиственница (*Larix sibirica*) (16%);
- сосна (*Pinus sylvestris*) (5%);
- смешанные леса с преобладанием лиственных пород (*Betula* spp., *Populus tremula*) (12%).



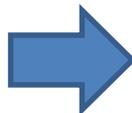
Использованные данные

Продукт MCD64A1



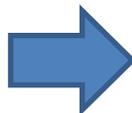
Расположение и время появления гарей

Продукт MOD09A1



Степень пирогенной нарушенности и оценка послепожарной динамики

Продукт MOD14A1



Радиационная мощность пожаров

Карта типов растительности



Преобладающие типы древостоев

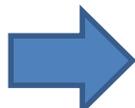
Продукт изменения лесного покрова



Районы гибели древостоев

Использованные данные

MCD64A1

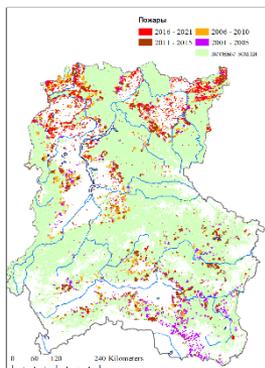


Расположение и время появления гарей

MOD14A1



Радиационная мощность пожаров



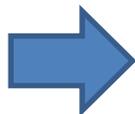
Площади гарей

Период: 2001 – 2023 годы, векторная геоинформационная база ИЛ СО РАН

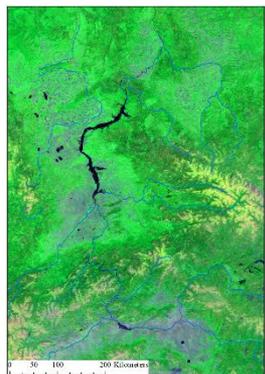
Продукт тепловых аномалий MODIS (MOD14A1)

Период: 2001 – 2023 годы, пространственное разрешение – 1000 м

MOD09A1



Степень пирогенной нарушенности



Период: 2001 – 2023 годы, пространственное разрешение – 500 м

Для оценки состояния растительности использовался нормализованный индекс гарей (NBR)

$$\text{NBR} = (R_2 - R_7) / (R_2 + R_7) \quad (1)$$

$$\text{dNBR} = \text{NBR}_{\text{prefire}} - \text{NBR}_{\text{postfire}} \quad (2)$$

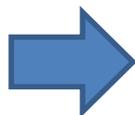
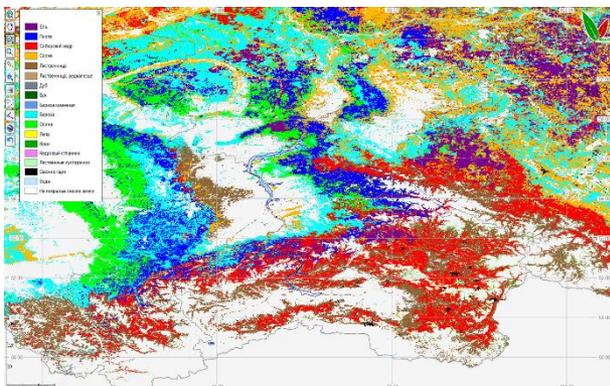
где R_2 и R_7 – отражательные способности во 2 и 7 каналах MODIS;

$\text{NBR}_{\text{prefire}}$ – значение NBR в год, предшествовавший пожару;

$\text{NBR}_{\text{postfire}}$ – значение NBR в год после пожара.

Использованные данные

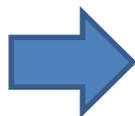
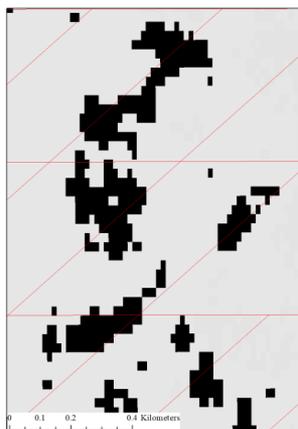
Карта растительности



Преобладающие типы древостоев

Преобладающие породы древостоев на территории района исследования определялись с помощью карты, разработанной в ИКИ РАН и доступной через сервис VEGA (<http://pro-vega.ru/maps/>)

Global forest change product



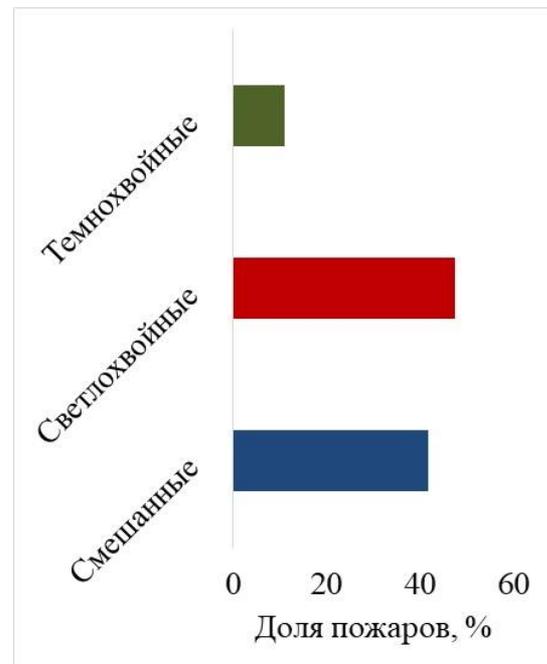
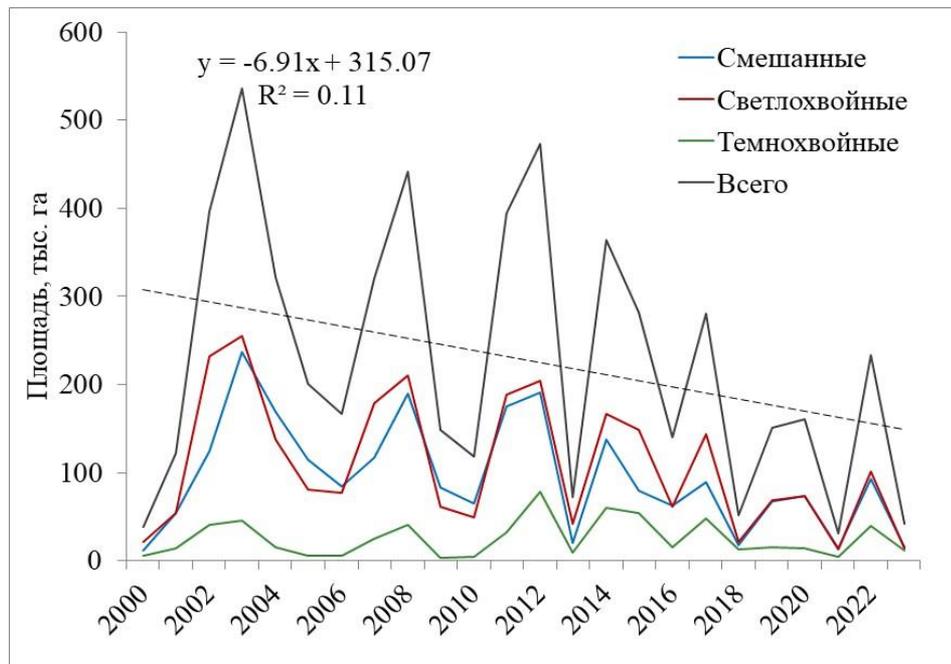
Районы гибели древостоев

Для выделения участков, где имела место послепожарная гибель древостоев, мы использовали глобальный продукт изменения лесов версии 1.9, сформированный по данным Landsat. Пространственное разрешение около 30 м. Доля погибшего древостоя – отношение числа пикселей продукта изменения лесов, где произошла гибель древостоя, к общему количеству пикселей в пределах одного пикселя продукта гарей MODIS

Черные области соответствуют участкам, где имела место гибель древостоя. Пиксели продукта MODIS 500 м показаны красным цветом.

<https://storage.googleapis.com/earthenginepartners-hansen/GFC-2021-v1.9/download.html>

Площадь гарей и число пожаров



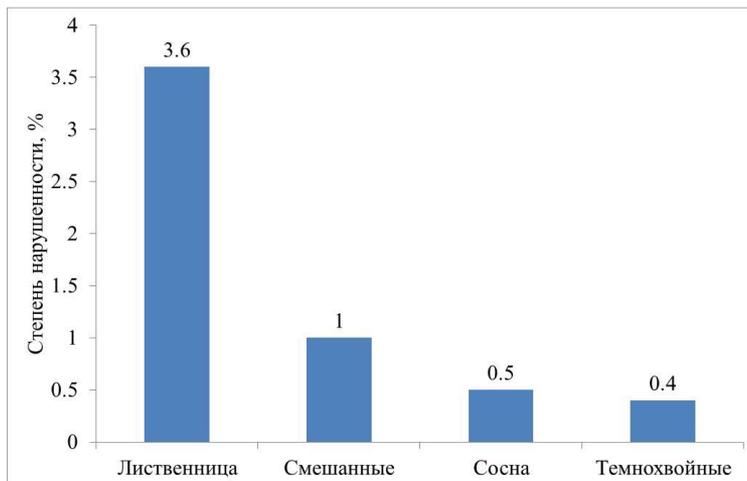
Среднегодовая площадь, пройденная пожарами в период с 2000 по 2023 годы, составила $230,1 \pm 152,4$ (среднее значение \pm стандартное отклонение) тыс. га. Самая большая годовая площадь пожаров наблюдалась в 2003 г. (536 тыс. га), а наименьшая – в 2021 г. (32 тыс. га). В период с 2000 по 2023 гг. в регионе наблюдалось снижение площади пожаров. Тренд, впрочем, не являлся статистически значимым.

Степень нарушения

Относительная площадь гарей (RBA) рассчитывалась как:

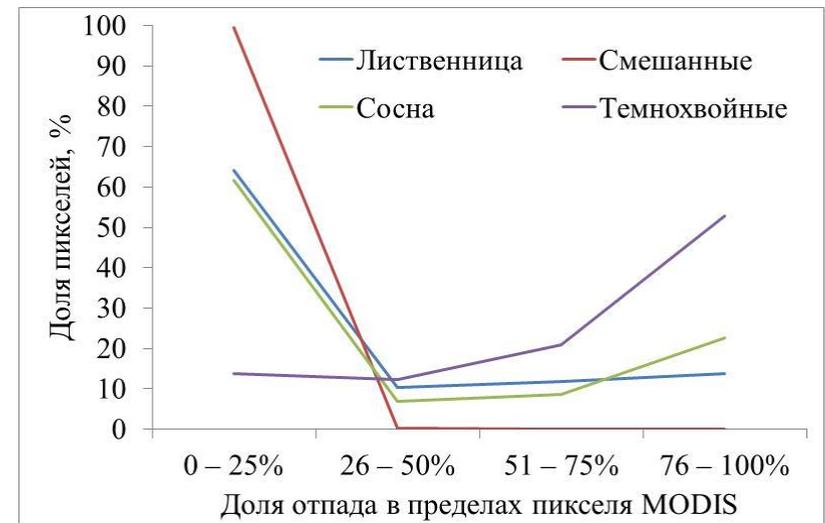
$$RBA = \frac{\sum_{i=1}^N S_{fire(i)}}{S_{forest}} \times 100\%$$

$S_{fire(i)}$ – площадь, пройденная огнем, (в год i) в пределах данного типа древостоя (в тыс. га);
 S_{forest} – площадь древостоев данного типа (в тыс. га).



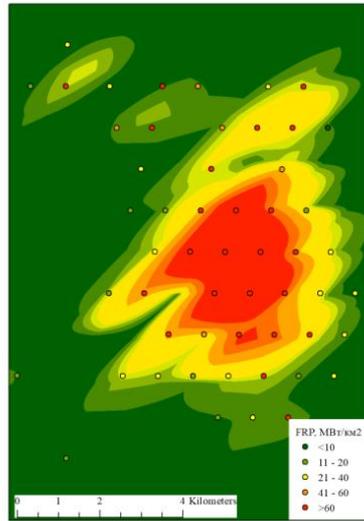
RBA преобладающих типов древостоев

Мы также классифицировали площадь пожаров MODIS в соответствии с долей послепожарного отпада древостоя. Мы использовали 4 класса: низкий (0–25%), средний (26–50%), высокий (51–75%) и очень высокий (76–100%), указывающий долю площади пикселя MODIS, где произошла гибель древостоя.

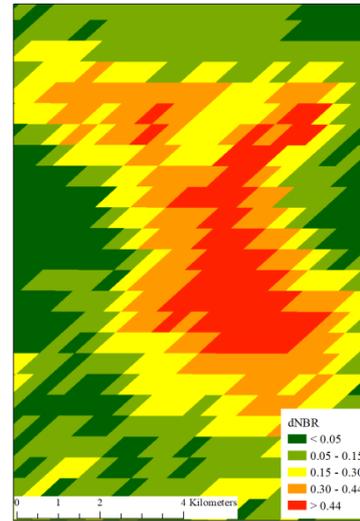


Степень пирогенной нарушения в древостоях

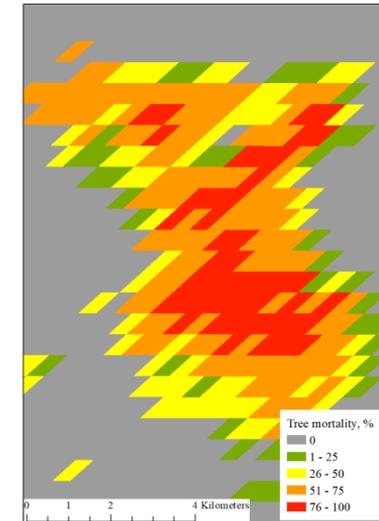
Степень пирогенной нарушенности



FRP



dNBR



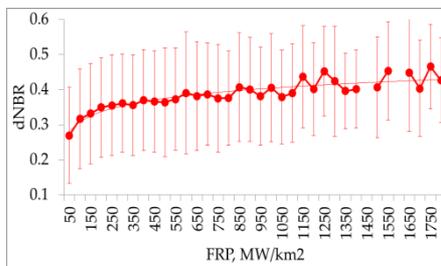
Доля отпада древостоя, %

Пространственное распределение мощности теплоизлучения пожара (FRP), индекс dNBR и доля отпада древостоя для одного пожара. Выгоревшие участки, на которых произошло горение высокой интенсивности (высокие значения FRP), хорошо соответствуют участкам, где также наблюдались высокие значения dNBR и отпада древостоя.

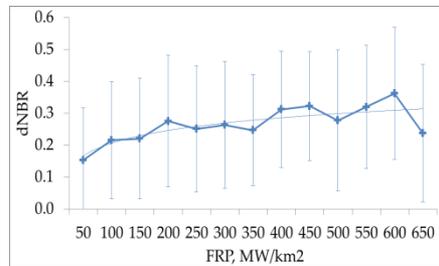
Радиационная мощность пожара и спектральные изменения

Пожарные пиксели были сгруппированы в 50-МВт группы для каждой из которых были рассчитаны средние значения dNBR и стандартные отклонения. Связь между FRP и средними значениями dNBR в этих интервалах описывалась с помощью логарифмической функции ($R^2 = 0.46$; $p < 0.05$). Например, для лиственных древостоев рост FRP с 50 до 750 МВт/км² сопровождался ростом dNBR на 43%, однако, последующий рост FRP с 750 до 1750 МВт/км² сопровождался уже значительно меньшим ростом dNBR (около 8%).

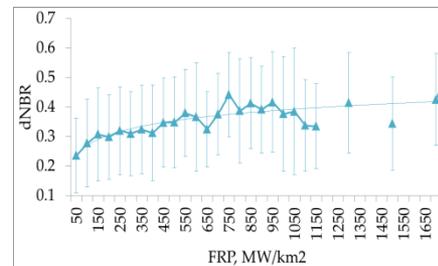
Соотношения между FRP и dNBR для преобладающих типов древостоев. Показаны только интервалы, содержащие более 50 пожарных пикселей.



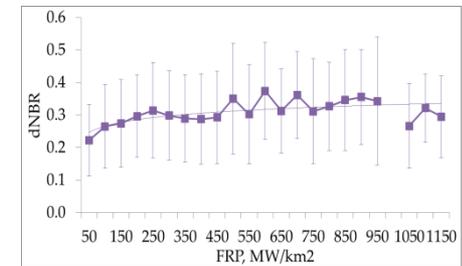
Лиственные леса



Смешанные леса

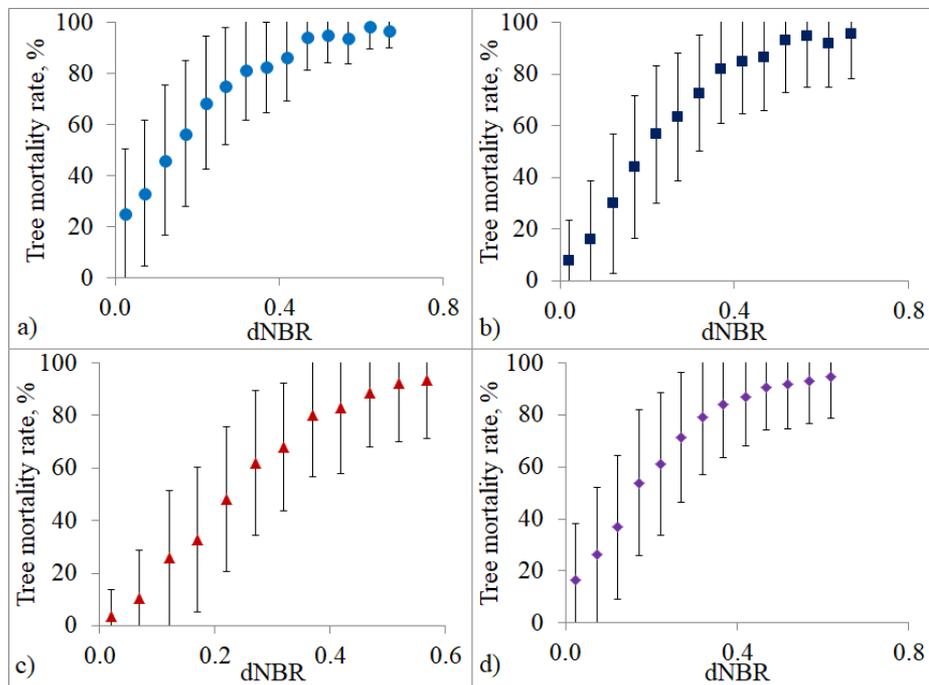


Темнохвойные леса



Сосновые леса

Величина dNBR и уровень отпада древостоя



а) темнохвойные леса, б) лиственничные леса, с) смешанные леса, д) сосновые леса.

Мы обнаружили статистически значимую связь между степенью нарушения, оцененной с помощью индекса dNBR, и долей площади пикселя, на которой произошла гибель деревьев после пожара. Для разных преобладающих пород деревьев дисперсия колебалась от 0,78 в случае лесов с преобладанием сосны до 0,91 в лесах с преобладанием лиственных пород при доверительной вероятности $p < 0,05$.

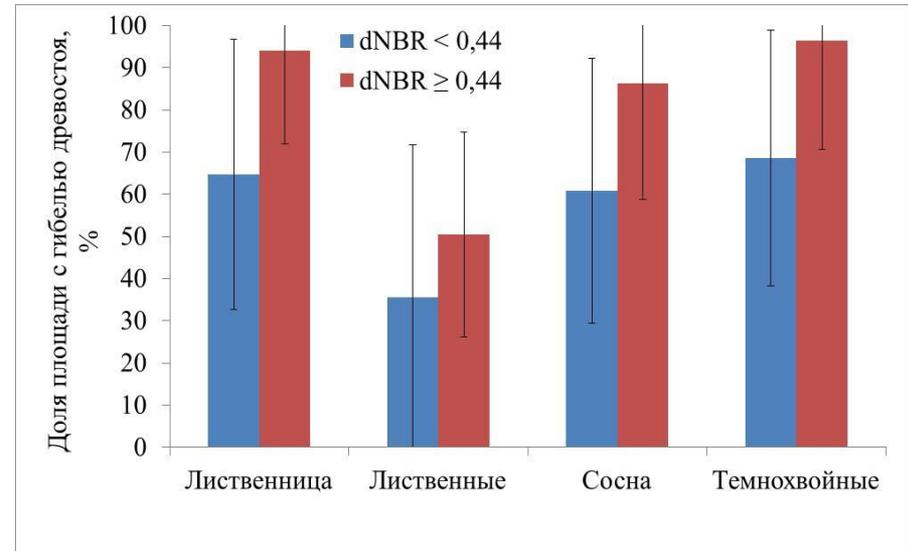
Преобладающая порода	Площадь пожаров как доля от общей площади лесов, %	Доля различных классов послепожарного отпада древостоя в площади пожаров, %			
		0 – 25%	26 – 50%	51 – 75%	76 – 100%
Лиственница	3.6	64.1	10.4	11.8	13.7
Смешанные	1.0	99.6	0.3	0.0	0.1
Сосна	0.5	61.7	7.0	8.6	22.7
Темнохвойные	0.4	13.8	12.4	21.0	52.8

Классы dNBR

Классы нарушенности по Key & Benson (2006)

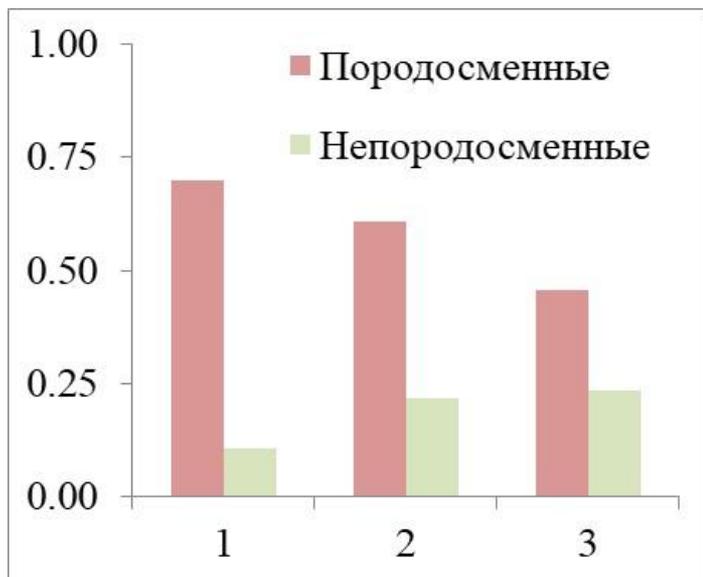
Severity level	dNBR range
Enhanced regrowth (high)	-0.5 to -0.251
Enhanced regrowth (low)	-0.25 to -0.101
Unburned	-0.1 to 0.099
Low severity	0.1 to 0.269
Moderate-low severity	0.27 to 0.439
Moderate-high severity	0.44 to 0.659
High severity	0.66 to 1.3

Key C.H., Benson N.C. Landscape Assessment (LA) sampling and analysis methods. USDA Forest Service - General Technical Report RMRS-GTR-164-CB. 2006.

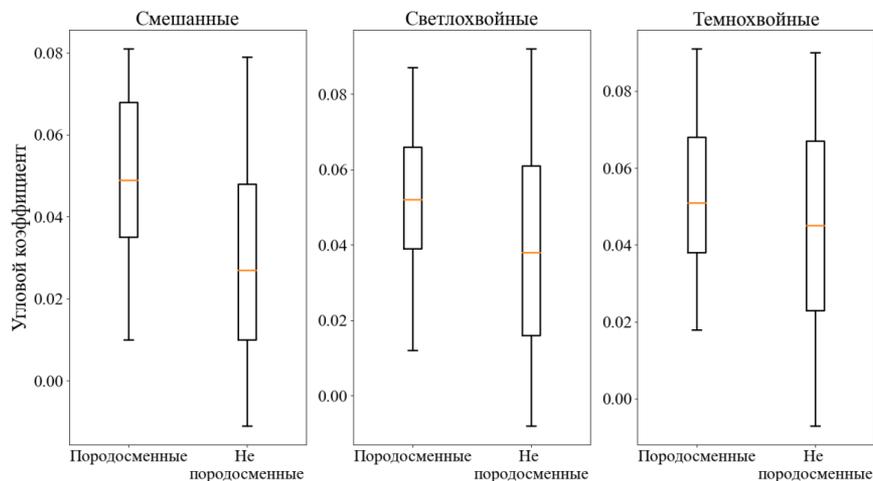


К сильно нарушенным можно отнести гари с dNBR более 0,44. Для всех преобладающих типов леса регрессионный анализ показал статистически значимую разницу ($p < 0,05$) между dNBR и долей пикселей пожара, на которой произошла гибель древостоя.

Послепожарная динамика dNBR для участков разной степени нарушенности

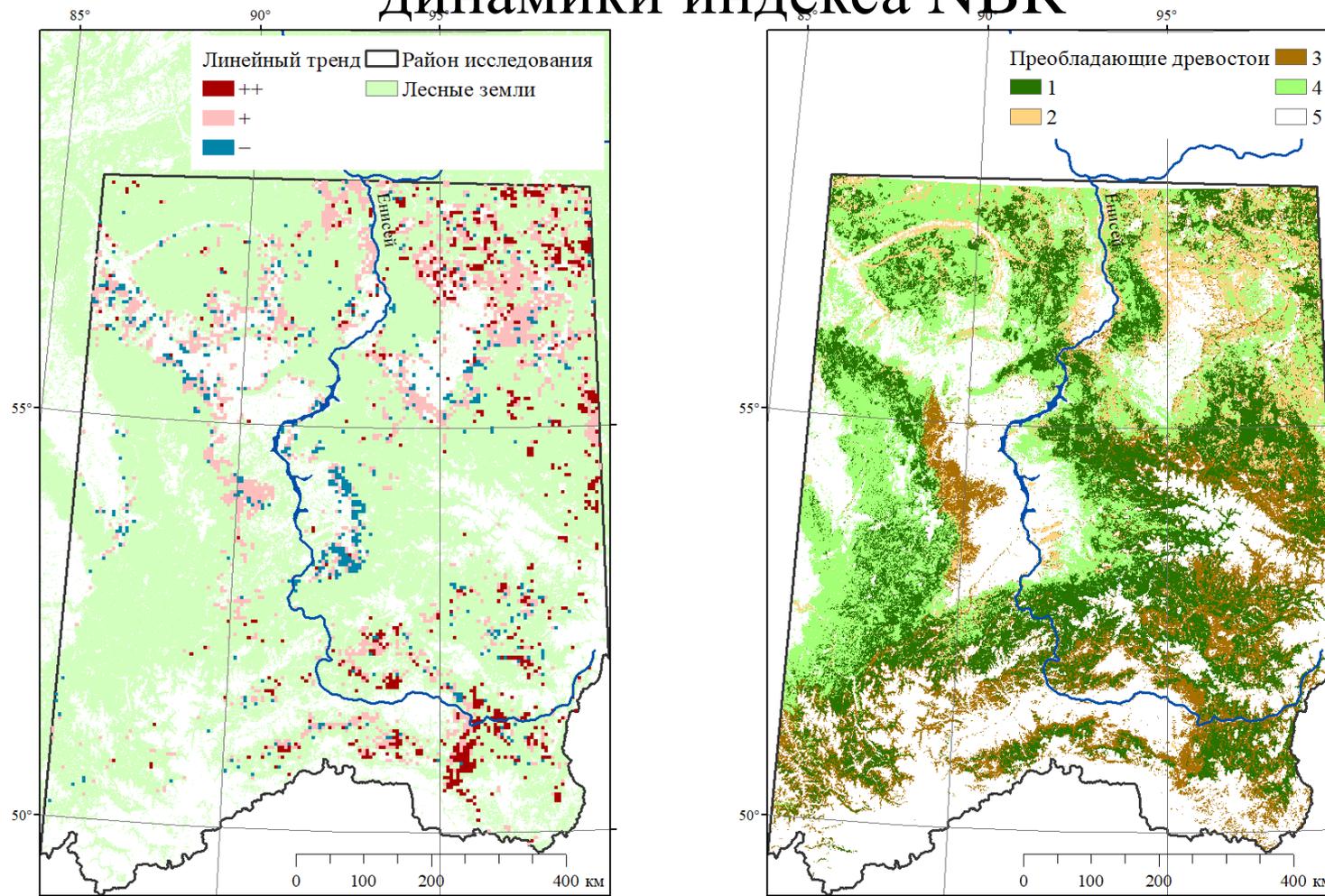


Доля площади, пройденной огнём, на которой наблюдалось восстановление индекса NBR. Цифрами обозначены преобладающие породы: 1 – смешанные леса; 2 – светлохвойные леса; 3 – темнохвойные леса.



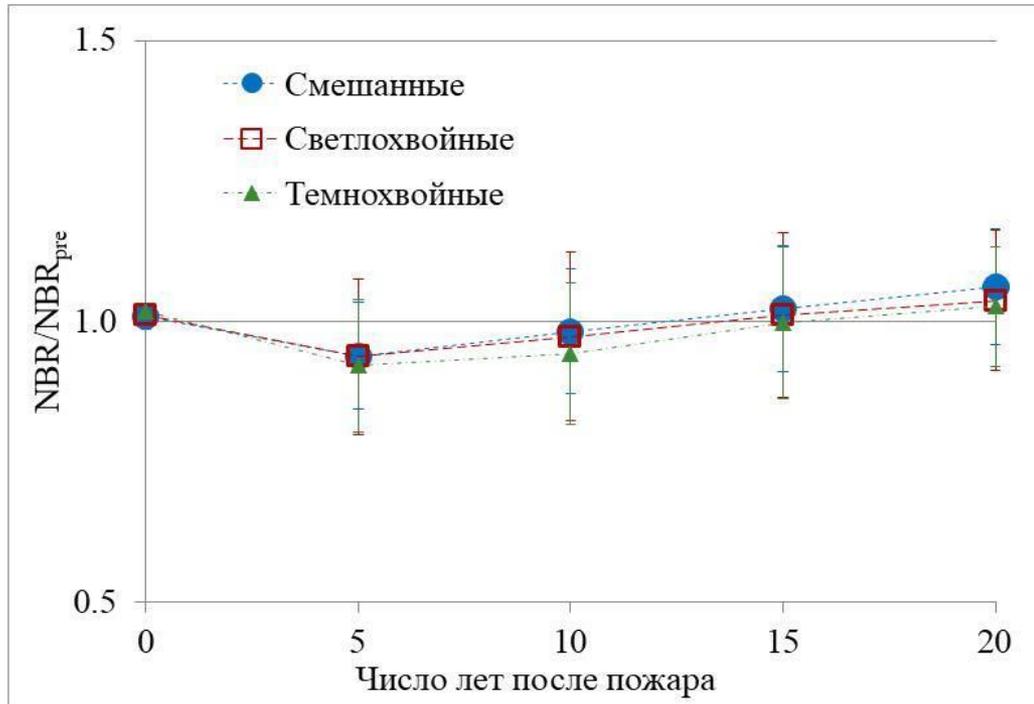
Рост спектральных индексов на участках, где имела место высокая степень пирогенной нарушенности, был быстрее, чем на участках средней/слабой степени нарушенности. Прямоугольником показан интервал от первого до третьего квартиля. Планки погрешности соответствуют интервалам с 1 по 99 процентилю. Оранжевые линии отмечают медианные значения.

Пространственное распределение восстановительной динамики индекса NBR



(а) пространственное распределение восстановительных трендов индекса NBR. Обозначения: '++' – значимый ($p < 0.05$) положительный тренд; '+' – не значимый положительный тренд; '-' – отсутствие восстановления; (б) преобладающие древостои обозначены цифрами: 1 – темнохвойные леса; 2 – леса с преобладанием сосны; 3 – лиственные леса; 4 – лиственные леса; 5 – нелесные земли.

Послепожарная динамика dNBR



Средние значения и стандартные отклонения величины NBR/NBR_{pre} за период 5 – 20 лет после воздействия пожара. Планки погрешности соответствуют одному стандартному отклонению.

Для оценки послепожарного восстановления спектральных характеристик территории использовалось соотношение NBR/NBR_{pre} , где NBR – величина нормализованного индекса гарей после воздействия пожара, NBR_{pre} – допожарное значение индекса (среднее значение индекса гарей за 3 года до пожара). Анализ относительных значений индекса гарей (т.е. величины NBR/NBR_{pre}) показал, что его восстановление к допожарным значениям (т.е. $NBR/NBR_{pre} = 1$) для смешанных и светлохвойных лесов происходит спустя 12 – 13 лет после пирогенного воздействия, в то время как в темнохвойных лесах этот период составляет 14 – 15 лет.

Основные результаты

- Обнаружен тренд к снижению площади гарей в южных регионах Центральной Сибири.
- Наибольшие значения относительной горимости наблюдались в лесах с преобладанием лиственницы и сосны, за которыми следовали смешанные леса. Темнохвойные леса характеризовались самыми низкими значениями относительной горимости.
- Наибольший уровень гибели древостоев наблюдался в темнохвойных лесах: в 74% пожарных пикселей MODIS отпад древостоя был на более чем 50% площади пикселя. Наименьший уровень отпада древостоя наблюдался в смешанных лесах с преобладанием лиственных пород. В случае лиственничных и сосновых насаждений примерно в 25–30 % пожарных пикселей происходил отпад древостоя на более чем 50 % площади пикселя.
- Для всех преобладающих типов древостоев имели место статистически значимые ($p < 0.05$) различия доли пикселя, где происходила гибель древостоя, для разных уровней индекса dNBR. Например, для пожарных пикселей MODIS, где величины dNBR превышала 0.44, доля пикселей, где имела место гибель древостоя, была на 40–50% выше по сравнению с пикселями, в которых значения dNBR были менее 0.44.
- Доля породосменных пожаров в регионе была невысокой и составляла около 10% от общей площади, пройденной огнём, при этом в темнохвойных лесах она была существенно выше и составляла около 30%. Восстановление спектрального индекса NBR, который использовался для оценки послепожарной динамики растительности, наблюдалось примерно на 76% территории, пройденной огнём. Леса с преобладанием светлохвойных пород характеризовались более успешным послепожарным восстановлением.
- Восстановление спектрального индекса NBR к допожарным значениям для смешанных и светлохвойных лесов региона происходит спустя 12 – 13 лет после пирогенного воздействия, а в темнохвойных лесах этот период составляет 14 – 15 лет.

Спасибо за внимание!