

Оценка многолетней динамики лесных пожаров и степени их нарушенности на юге Сибири по данным MODIS

Е.Г. Швецов^{1,2*}, А.С. Голуков^{1,3,4}, В.И. Харук^{1,3,4}

¹ Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, обособленное подразделение
ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, 660036

² Хакасский государственный университет, Абакан, 655017, Россия

³ Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041

⁴ Томский государственный университет, Томск, 634050

Задачи исследования

Основной целью данной работы был анализ многолетней динамики горимости и степени пирогенной нарушенности на юге Средней Сибири.

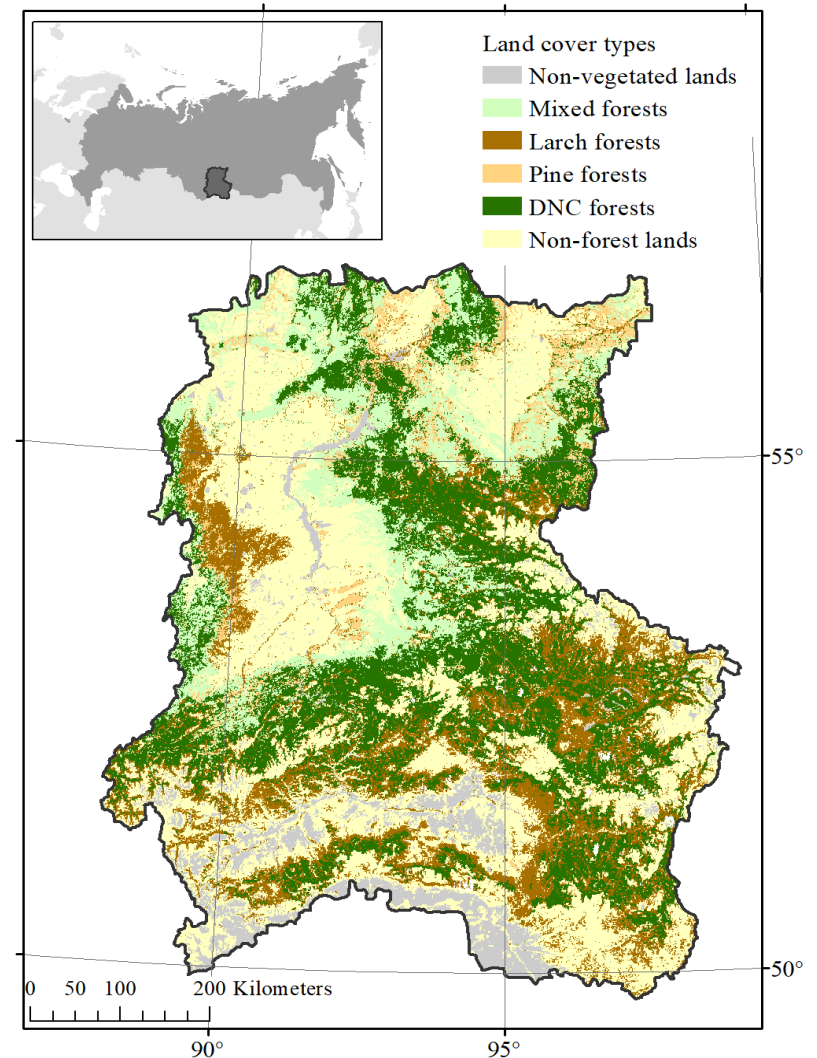
1. Какова сезонная и годовая динамика площади гарей;
2. Как площадь территории, пройденной огнем, соотносится с топографическими особенностями местности (высота, наклон и крутизна склона);
3. Как площадь пожаров зависит от эколого-климатических переменных;
4. Какова связь между радиационной мощностью пожара (FRP) и степенью пирогенной нарушенности растительности, оцениваемой с помощью индекса dNBR;
5. Какова доля гарей с разным уровнем послепожарного отпада древостоев?

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

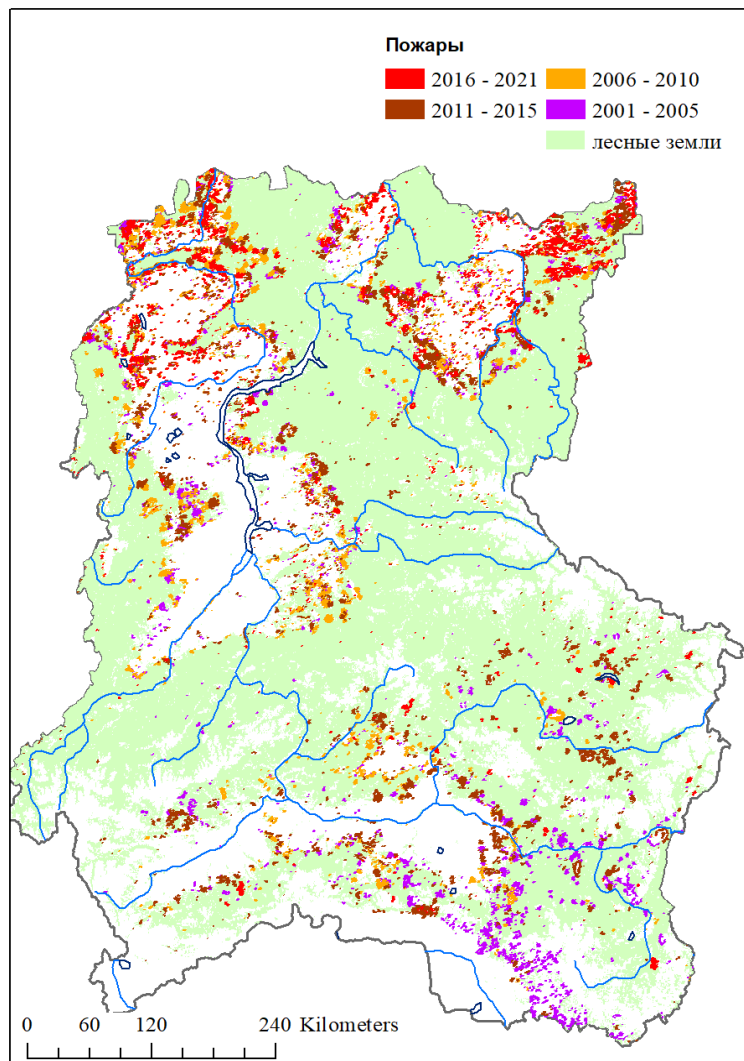
- темнохвойные леса: кедр (*Pinus sibirica*) и пихта (*Abies sibirica*) (25%);
- лиственница (*Larix sibirica*) (16%);
- сосна (*Pinus sylvestris*) (5%);
- смешанные леса с преобладанием лиственных пород (*Betula* spp., *Populus tremula*) (12%).



Использованные данные



Продукт площадей гарей и продукт ТЕПЛОВЫХ АНОМАЛИЙ



Продукт площадей гарей MODIS (MCD64A1)

Период: 2001 – 2021 годы

Пространственное разрешение – 500 м

Продукт тепловых аномалий MODIS (MOD14A1)

Период: 2001 – 2021 годы

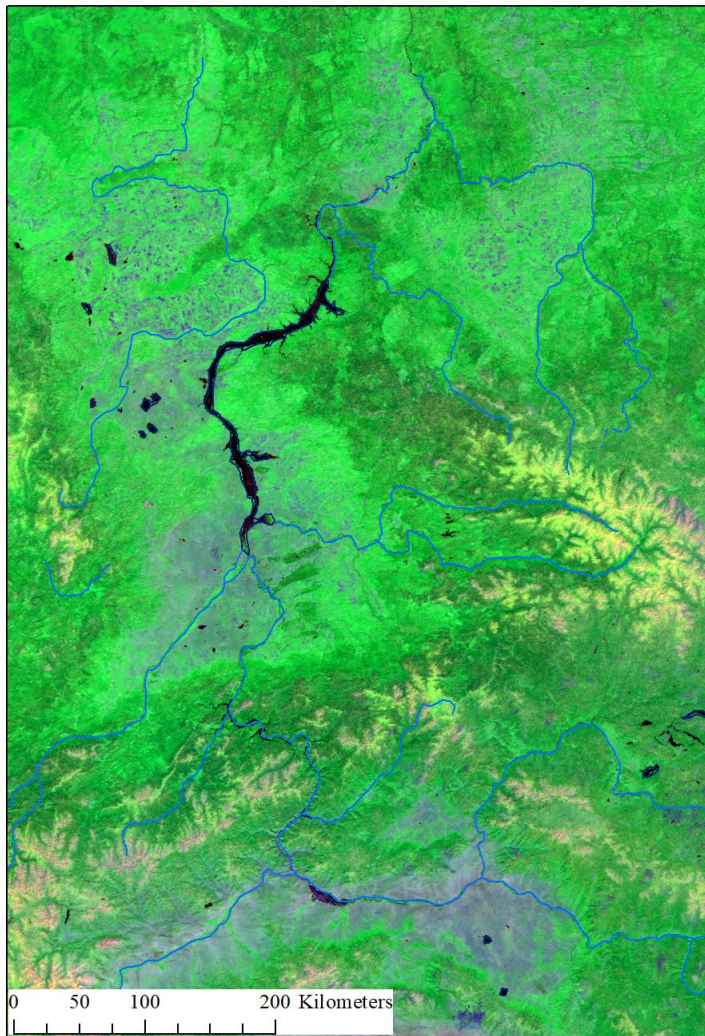
Пространственное разрешение – 1000 м

Анализировались только пожары на лесных
землях

<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>

Продукт отражательной способности поверхности

способности поверхности



Продукт отражательной способности поверхности MODIS (MOD09A1)

Период: 2001 – 2021 годы

Пространственное разрешение – 500 м

Для оценки состояния растительности использовался нормализованный индекс гарей (NBR)

$$\mathbf{NBR} = (\mathbf{R}_2 - \mathbf{R}_7) / (\mathbf{R}_2 + \mathbf{R}_7) \quad (1)$$

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

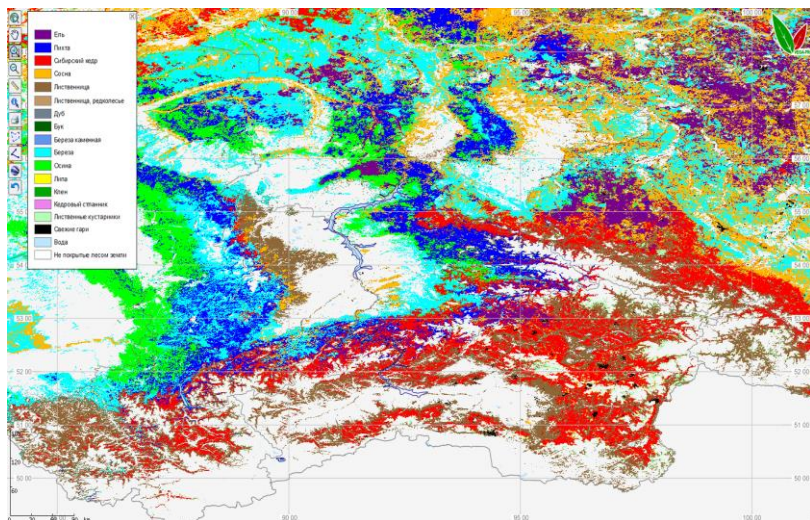
где R_2 и R_7 – отражательные способности во 2 и 7 каналах MODIS;

NBR_{prefire} – значение NBR в год, предшествовавший пожару;

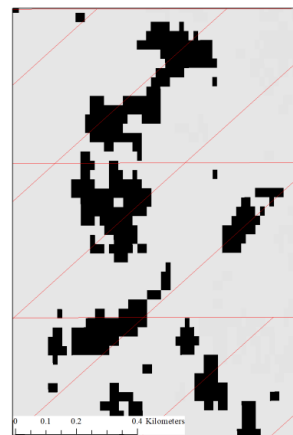
NBR_{postfire} – значение NBR в год после пожара.

Преобладающие типы древостоя и карта гибели древостоя

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/>)

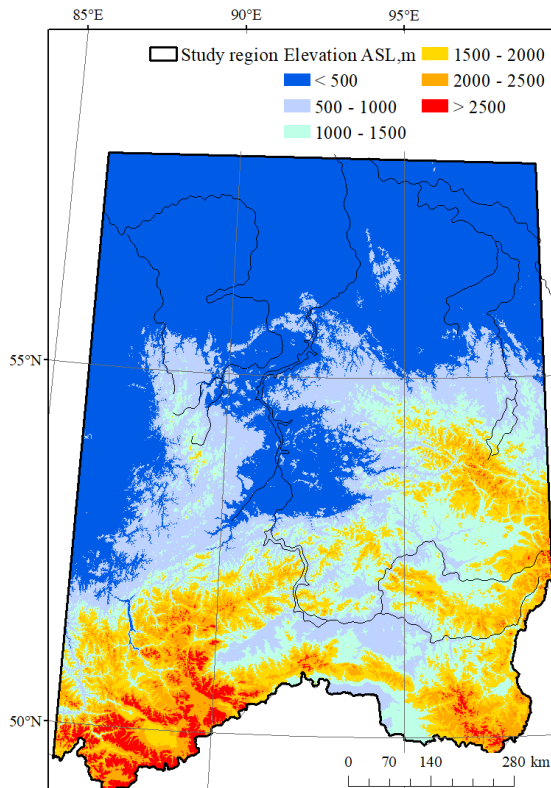


Для выделения участков, где имела место послепожарная гибель древостоев, мы использовали глобальный продукт изменения лесов версии 1.9, сформированный по данным Landsat. Пространственное разрешение около 30 м. Доля погибшего древостоя – отношение числа пикселей продукта изменения лесов, где произошла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

Цифровая модель рельефа

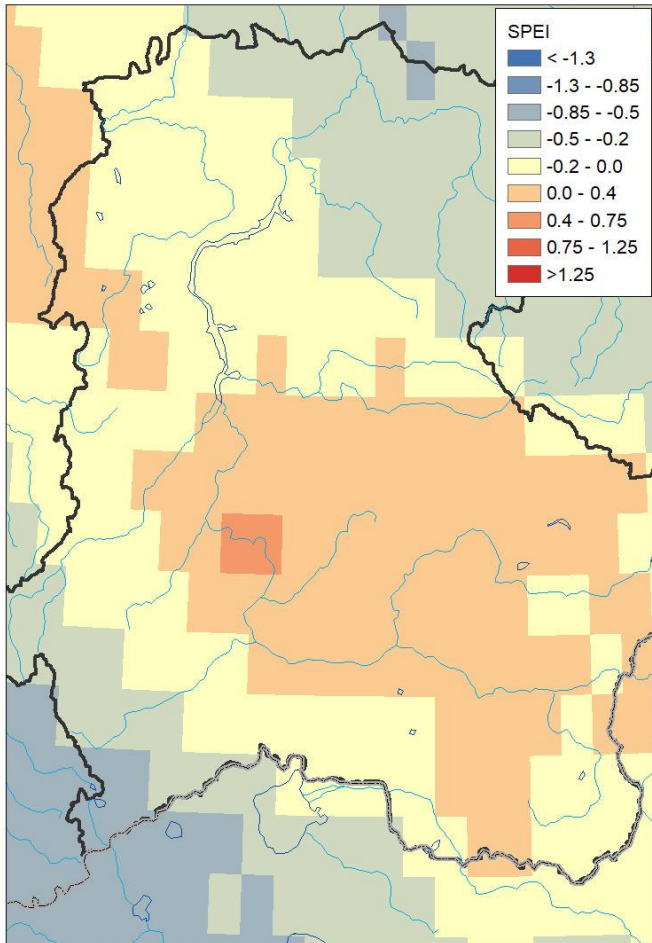


Terrain datasets, such as elevation, aspect and slope were obtained using ASTER global digital elevation model of version 3.

This dataset was downloaded from the NASA Earthdata service (<https://earthdata.nasa.gov/>) and provides terrain elevation data with spatial resolution of about 30 m.

The northern part of the region is dominated by plains and lowlands with elevations ranging from 100 to 650 m. Southern part of the region includes East and West Sayan Mountains and is characterized by higher elevations ranging between 500 and 3400 m above sea level.

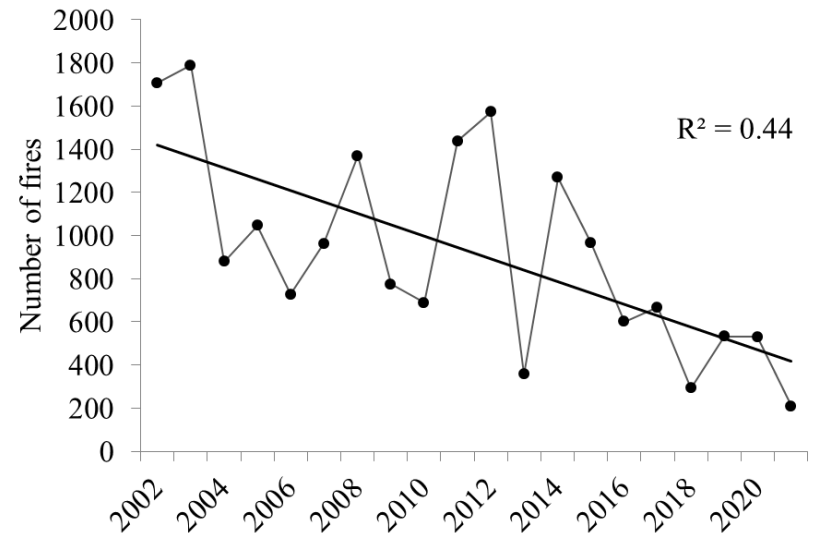
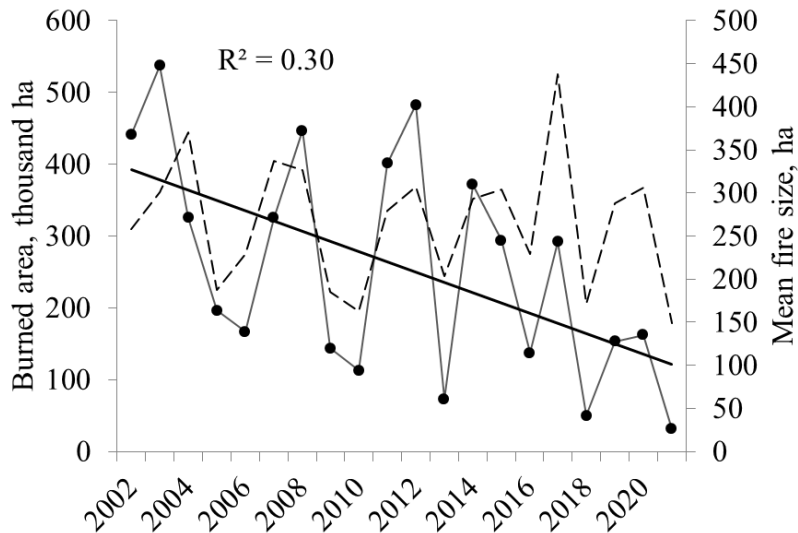
Климатические данные и индекс засушливости



Данные по индексу засушливости SPEI были загружены с помощью SPEI Global Drought Monitor (<http://sac.csic.es/spei/map/maps.html>). SPEI представляет собой разницу между количеством осадков (P) и потенциальным суммарным испарением (PET) и рассчитывается как $SPEI = P - PET$. Пространственное разрешение данных SPEI составляет $1 \times 1^\circ$.

Данные о температуре воздуха ($^\circ C$), количестве осадков (мм) и влажности почвы (m^3/m^3 ; глубина слоя почвы около 28 см), получены из базы данных ERA5-Land (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset;> пространственное разрешение $0,1^\circ \times 0,1^\circ$)

Площадь гарей и число пожаров



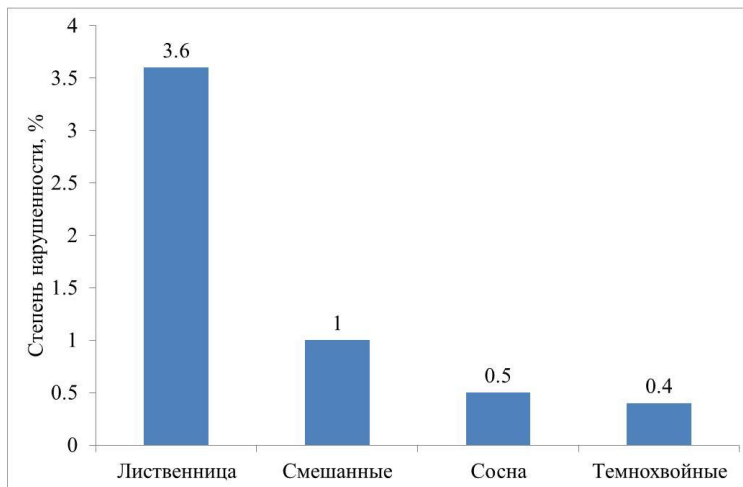
В период с 2002 по 2021 год мы наблюдали тенденцию к уменьшению годовой площади пожаров в регионе. Линейная регрессия была статистически значимой для пожаров как на лесных ($r^2 = 0,3$; $p < 0,05$) (скорость снижения – 14 тыс. га в год), так и на нелесных землях ($r^2 = 0,35$; $p < 0,01$) (скорость снижения – 30 тыс. га). в год). Мы также обнаружили статистически значимую связь между годовой площадью пожаров и средним размером пожара. Это означает, что в годы больших пожаров средние размеры пожаров в регионе, как правило, больше. В то же время мы не обнаружили существенного многолетнего тренда среднего размера пожаров. Временная динамика числа пожаров также показала значимую тенденцию к снижению как на нелесных ($r^2 = 0,52$; $p < 0,01$), так и на лесных землях ($r^2 = 0,44$; $p < 0,01$).

Степень нарушения

Относительная площадь гарей (RBA) рассчитывалась как:

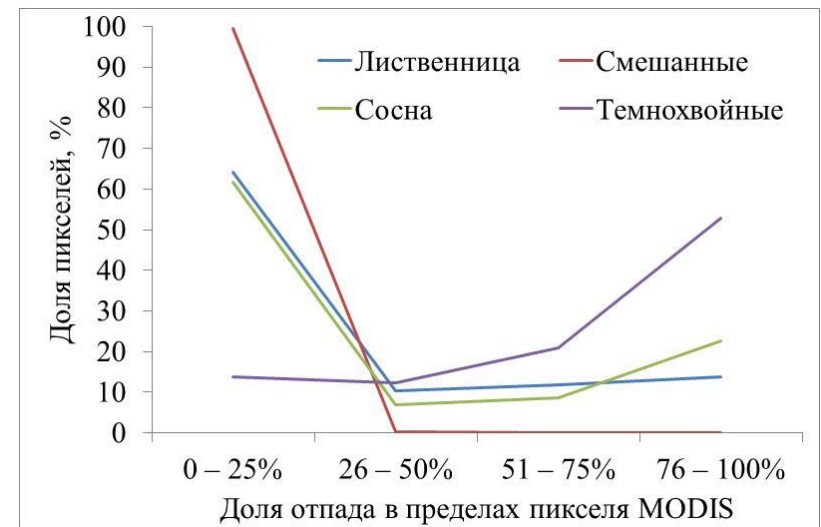
$$RBA = \frac{\sum_{i=1}^N S_{fire(i)}}{S_{forest}} \times 100\%$$

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



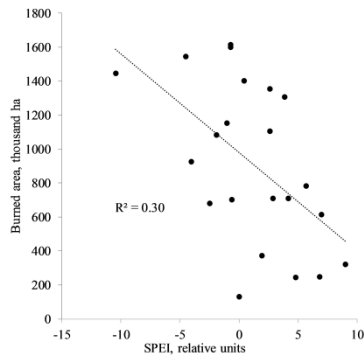
RBA преобладающих типов древостоев

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.



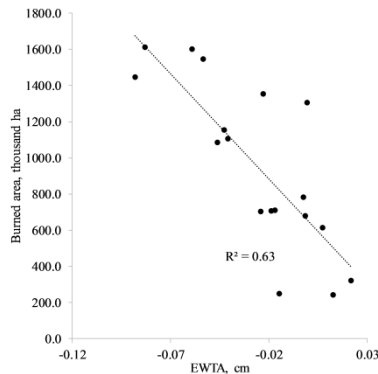
Степень пирогенной нарушения в древостоях

Площадь гарей и климатические и геофизические факторы

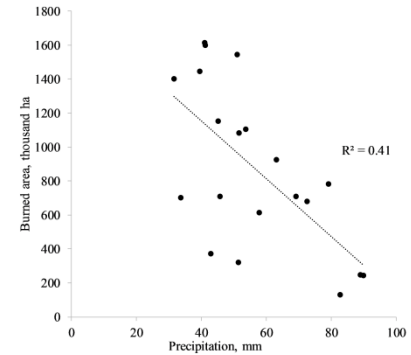
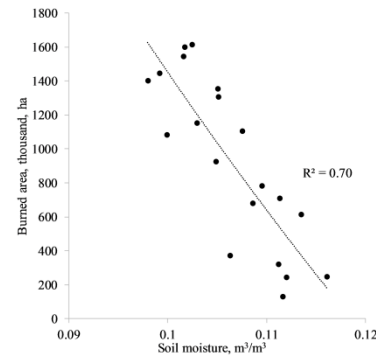


Мы обнаружили значимую корреляцию ($r^2 = 0.30$, $p < 0.05$) между площадью гарей и индексом SPEI в течение пожароопасного сезона (апрель – октябрь).

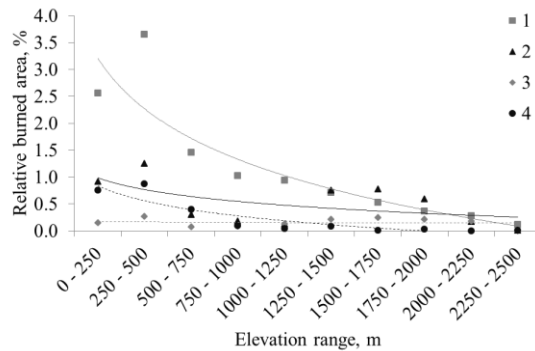
Мы также обнаружили значимую связь между влажностью почвы ($r^2 = 0.70$, $p < 0.01$) и количеством осадков ($r^2 = 0.40$, $p < 0.01$) и площадью, пройденной огнем, в мае, когда происходит большинство пожаров в регионе.



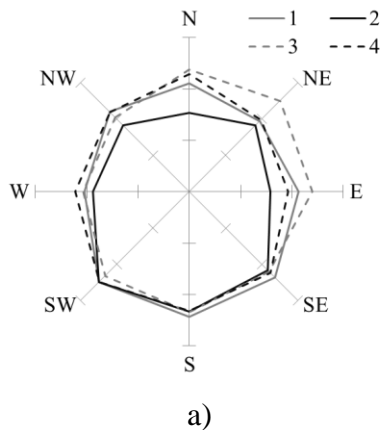
Также значимая связь была обнаружена между EWTA в летние месяцы (июль, август) и площадью гарей ($r^2 = 0.63$, $p < 0.01$).



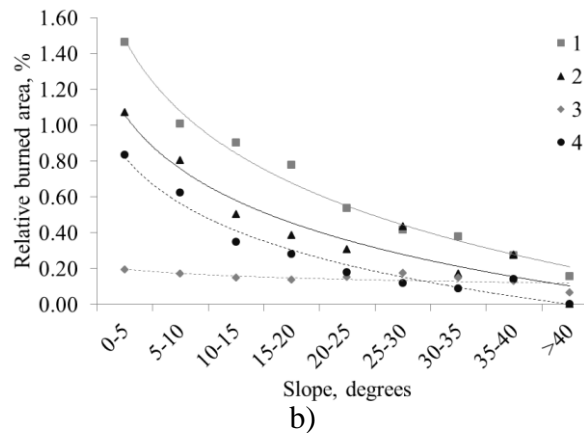
Относительная площадь гарей и топография МЕСТНОСТИ



РВА и высота местности



РВА и (а) экспозиция (b) крутизна склона.



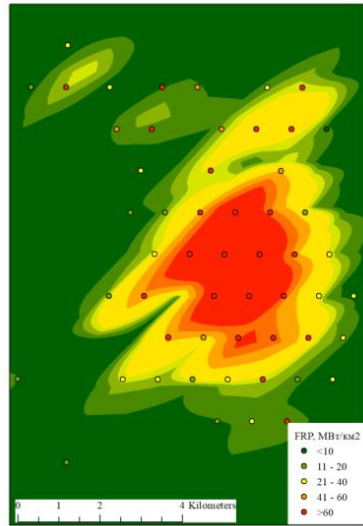
Типы древостоев: 1, 2 – лиственничные и сосновые; 3, 4 – темнохвойные и смешанные.

Относительная площадь гарей снижалась с увеличением высоты для всех типов древостоев кроме темнохвойных. На высотах 1500 м н.у.м. и выше, РВА для всех типов лесов не превышала 0.8%. В случае темнохвойных лесов РВА менялась слабо с высотой (0.1–0.3%). Изменение РВА с высотой описывалось с помощью логарифмической функции : $RVA = A \cdot \log(\text{Elevation}) + B$. Коэффициент А менялся от -1.3 для лиственничных лесов ($r^2 = 0.79$) до -0.02 для темнохвойных ($r^2 = 0.01$).

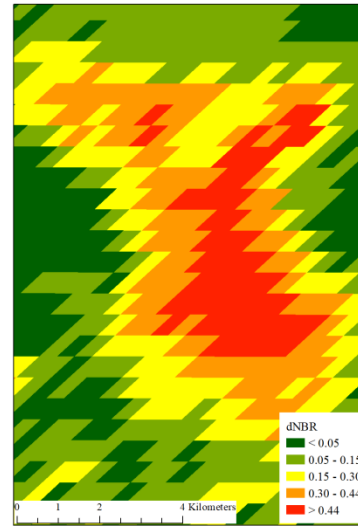
РВА для лиственничных и сосновых лесов была несколько выше на южных склонах (0.95% vs. 0.82% и 1.08% vs. 0.80%, соответственно). Для темнохвойных лесов РВА имела более высокие значения на восточных и северо-восточных склонах (0.19%) в сравнении со склонами других экспозиций (0.17%).

Мы также наблюдали снижение РВА с увеличением крутизны склонов, которое описывалось логарифмической функцией: $RVA = A \cdot \log(\text{Slope}) + B$ где А менялось от -0.58 лиственничных лесов ($r^2 = 0.98$) до -0.04 для темнохвойных ($r^2 = 0.50$).

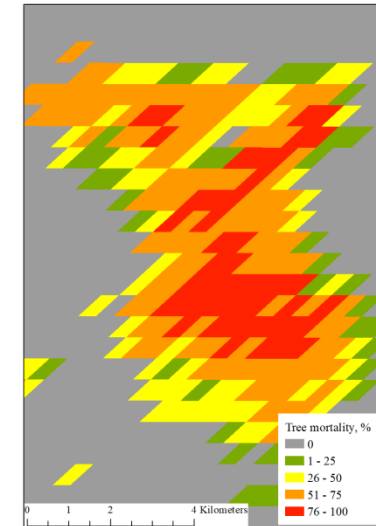
Степень пирогенной нарушенности



FRP



dNBR



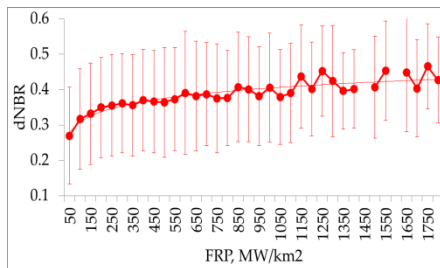
Доля отпада древостоя, %

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.

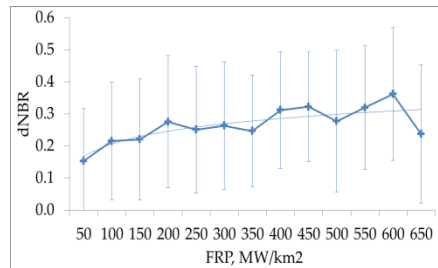
Радиационная мощность пожара и спектральные изменения

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%).

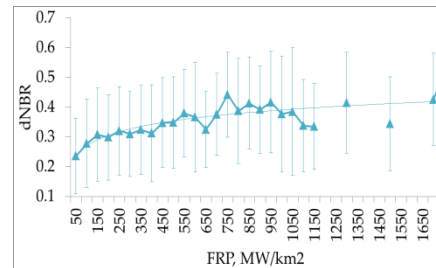
Соотношения между FRP и dNBR для преобладающих типов древостоев. Показаны только интервалы, содержащие более 50 пожарных пикселей.



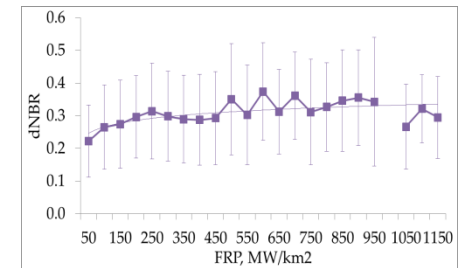
Лиственные леса



Смешанные леса

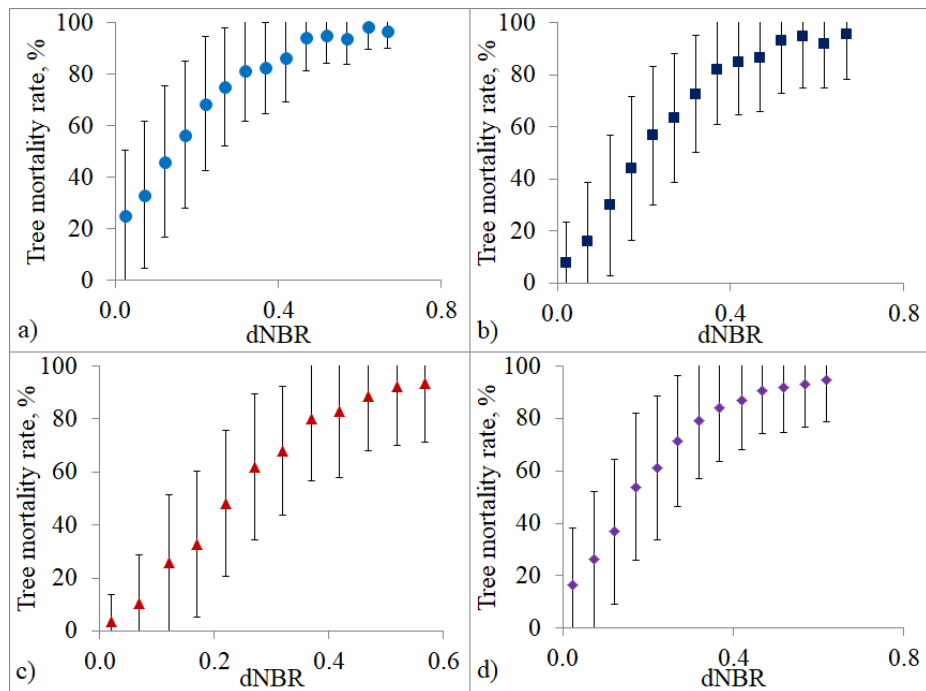


Темнохвойные леса



Сосновые леса

Связь между dNBR и уровнем отпада древостоя



a) 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 $p < 0,05$.

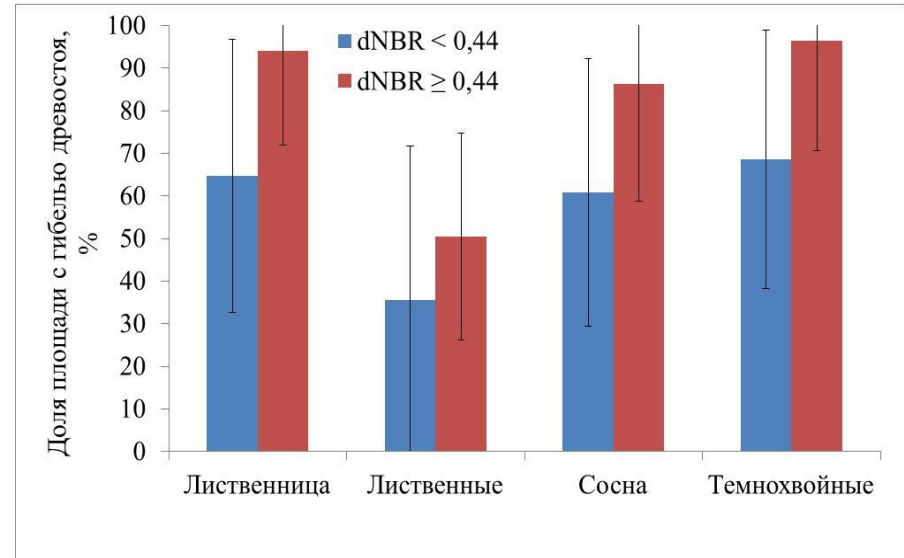
Преобладающая порода	Площадь пожаров как доля от общей площади лесов, %	Доля различных классов послепожарного отпада древостоя в площади пожаров, %			
		0 – 25%	26 – 50%	51 – 75%	76 – 100%
Лиственница	3.6	64.1	10.4	11.8	13.7
Смешанные	1.0	99.6	0.3	0.0	0.1
Сосна	0.5	61.7	7.0	8.6	22.7
Темнохвойные	0.4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

Основные результаты

- Мы обнаружили значимый тренд к снижению площади гарей в южных регионах Центральной Сибири начиная с 2002 года. Средняя площадь гарей в период с 2012 по 2021 год была на 34% ниже по сравнению с 2002–2011 годами.
- Площадь гарей в регионе сильно коррелировала с аномалиями влажности почвы (данные GRACE и модели ERA-5) ($r^2 = 0,63 - 0,70$). Прямые гравиметрические измерения (по данным GRACE) более тесно коррелировали с площадью пожаров. Также наблюдалась корреляция между площадью, пройденной огнем, и индексом засушливости (SPEI) ($r^2 = 0,30$).
- 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.
- Меньшие запасы горючих материалов и увеличение количества осадков на больших высотах привели к логарифмическому уменьшению площади пожаров при переходе от равнин к низкогорьям и высокогорьям. Самые высокие значения относительной горимости наблюдались в лесостепных (ниже 500 м над уровнем моря) районах и в межгорных котловинах для всех доминирующих древостоев, кроме темнохвойных, характеризующихся низким уровнем пожарной опасности.
- 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 лиственных 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.

Спасибо за внимание!