XXIV международная конференция
«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»,
9-13 ноября 2026

Энергетические характеристики пожаров и гибель лиственничных лесов Сибири в условиях меняющегося климата

Швецов Е.Г., Пономарёв Е.И.

ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск

Работа выполнена в рамках государственного задания Института леса ФИЦ КНЦ СО РАН FWES-2024-0023.

Задачи исследования

Основной целью данного исследования был количественный анализ взаимосвязи между энергетическими характеристиками пожаров в лиственничных древостоях лиственницы (*Larix sibirica, L. gmelinii*) и динамикой метеорологических условий. Также выполнен анализ связи между диапазонами значений радиационной мощности пожара (FRP) и фактическими данными о гибели древостоя за период 2001–2024 гг.

Задачи исследования включали:

- Оценку различий в показателях FRP между лесными регионами Сибири, а также оценку многолетней динамики (2001–2024 гг.) FRP и доли пожаров высокой интенсивности;
- Оценку пространственно-временной изменчивости FRP и климатических факторов, определяющих условия засухи;
- Анализ взаимосвязи между FRP, индексами пожарной опасности по условиям погоды и гибелью древостоя после пожаров.

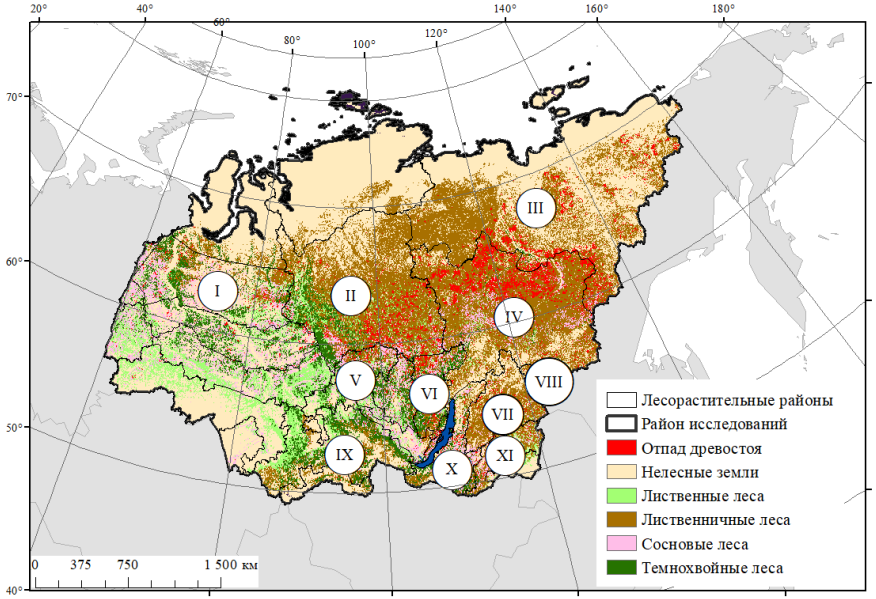
Район исследований

Исследования были выполнены для территории Сибири: 50 – 75° с.ш.; 60 – 160° в.д.

Общая площадь региона около $9{,}5\times10^6$ км^2.

Преобладающие лесообразующие породы:

лиственница (*Larix sibirica, L. gmelini*) (около 55% лесной площади района);
темнохвойные породы: кедр (*Pinus sibirica*), пихта (*Abies sibirica*) ель (*Picea obovata*) – около 13% площади;
сосна (*Pinus sylvestris*) (14%);
смешанные леса с преобладанием лиственных пород (*Betula spp., Populus tremula*) (18%).



В работе рассмотрены лесорастительные районы:
(I) Западно-Сибирский северо-таежный равнинный район; (II) Среднесибирский плоскогорный таежный район; (III) Восточно-Сибирский район притундровых лесов и редкостойной тайги; (IV) Восточно-Сибирский таежный мерзлотный район; (V) Нижнеангарский и (VI) Верхнеленский таежные районы; (VII) Забайкальский горномерзлотный район, (VIII) Дальневосточный таежный район; (IX) Алтае-Саянский горнотаежный район; Байкальский (X) и Забайкальский (XI) горные лесные районы

Ежегодная площадь потерь лесов в регионе составляет порядка 2,6±1,7 млн га, из которых около 1,9±1,6 млн га лесных площадей гибнет в результате воздействия пожаров.

Исходные данные



База данных пожаров и FRP

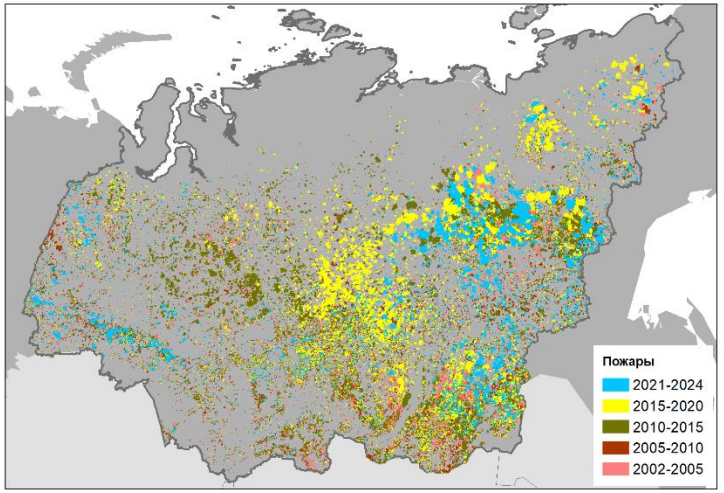
Продукт площадей гарей MODIS (MCD64A1)

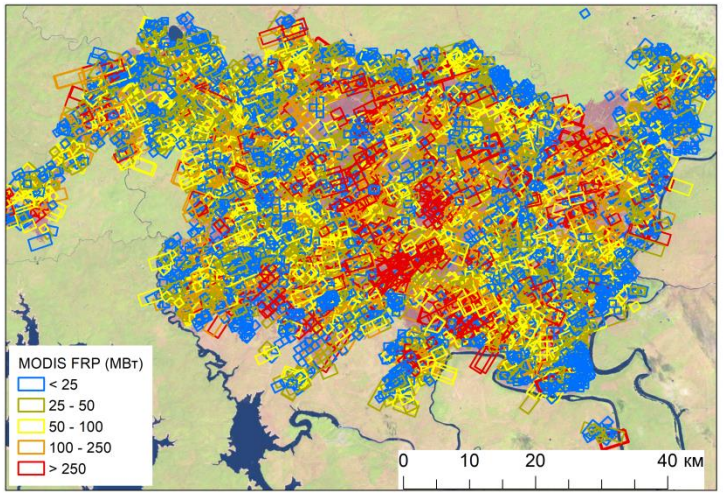
Период: 2001 – 2024 годы
Пространственное разрешение – 500 м

Продукт тепловых аномалий MODIS (MOD14)

Период: 2001 – 2024 годы
Пространственное разрешение – 1000 м

Источник данных:
https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov

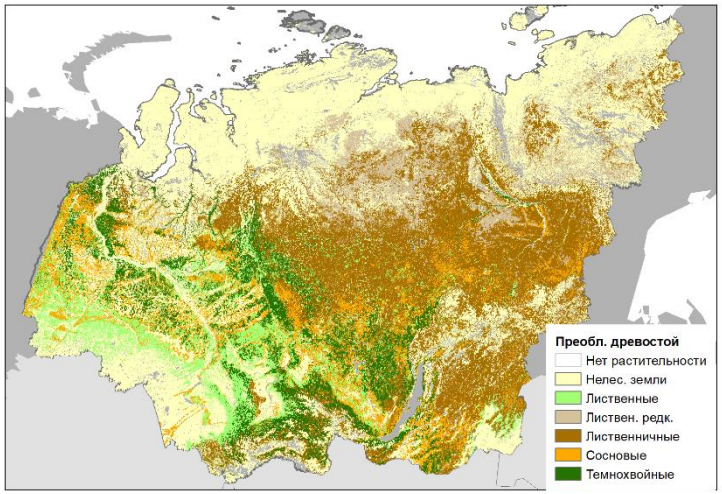


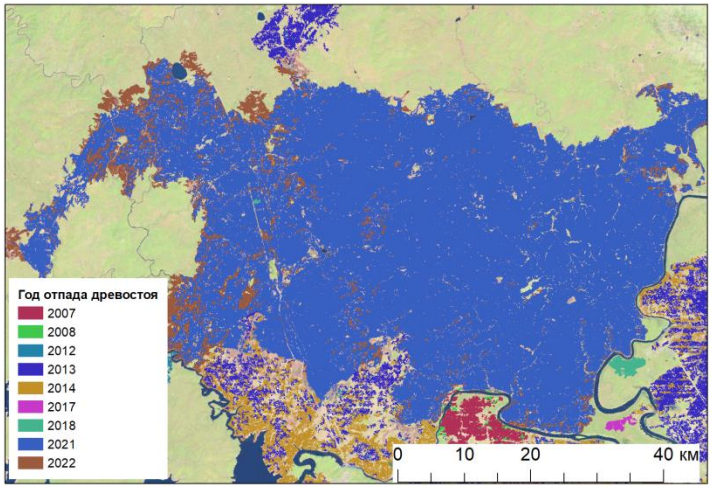


Преобладающие типы древостоев и послепожарный отпад

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/)

Глобальный продукт изменения лесов, сформированный по данным Landsat версии 1.12 был использован для выделения участков, где имела место послепожарная гибель древостоев. Пространственное разрешение около 30 м. Доля погибшего древостоя – отношение количества пикселей продукта изменения лесов, где произошла гибель древостоя, к общему количеству пикселей этого продукта в пределах одного пикселя выходного растра. Использовался временной порог в 3 года.
https://glad.earthengine.app/view/global-forest-change

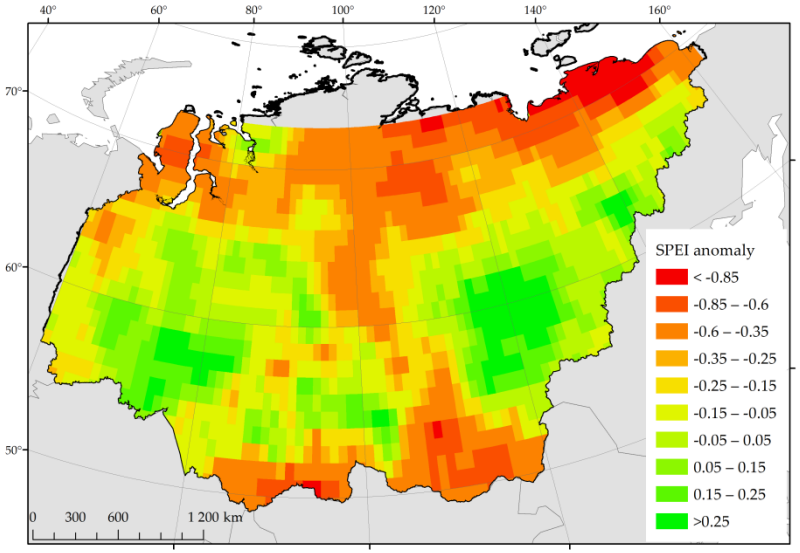




Климатические данные

Данные по температуре воздуха (°C), количеству осадков (мм) и влажности верхнего слоя почвы (0 – 7 см; $м^3/м^3$) брались из базы данных ERA5-Land (https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset; разрешение 0.1°×0.1°).

Индекс засушливости SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) загружался со SPEI Global Drought Monitor (http://sac.csic.es/spei/map/maps.html).
Индекс SPEI рассчитывается как разность между количеством осадков (P) и потенциального испарения (PET); SPEI = P – PET.



Индексы пожарной опасности

Для описания метеоусловий были использованы индексы канадской системы оценки пожарной опасности по условиям погоды (Canadian Forest Fire Weather Index (FWI)). Данная система включает 6 компонентов, описывающих как влажность лесных горючих материалов, так и характеристики пожара. В анализе использовалась глобальная база данных Global FWI (https://portal.nccs.nasa.gov/datashare/GlobalFWI/).

FFMC - уровень влажности в поверхностных горючих материалах небольшого размера. Глубина составляет 0–2 см.

DMC - уровень влажности в органической почве непосредственно под поверхностью, а также влажность горючих материалов среднего размера. Глубина составляет 2–7 см.

DC – уровень влажности в глубоких слоях почвы. Он измеряется на глубине 8–18 см под поверхностью.

ISI - учитывает скорость ветра и FFMC. Определяет, насколько быстро может распространяться пожар после возгорания.

BUI - комбинация DMC и DC и указывает, сколько горючих материалов доступно для сгорания.

FWI – результирующий индекс, прогнозирующий вероятную интенсивность пожара.

Структура FWI

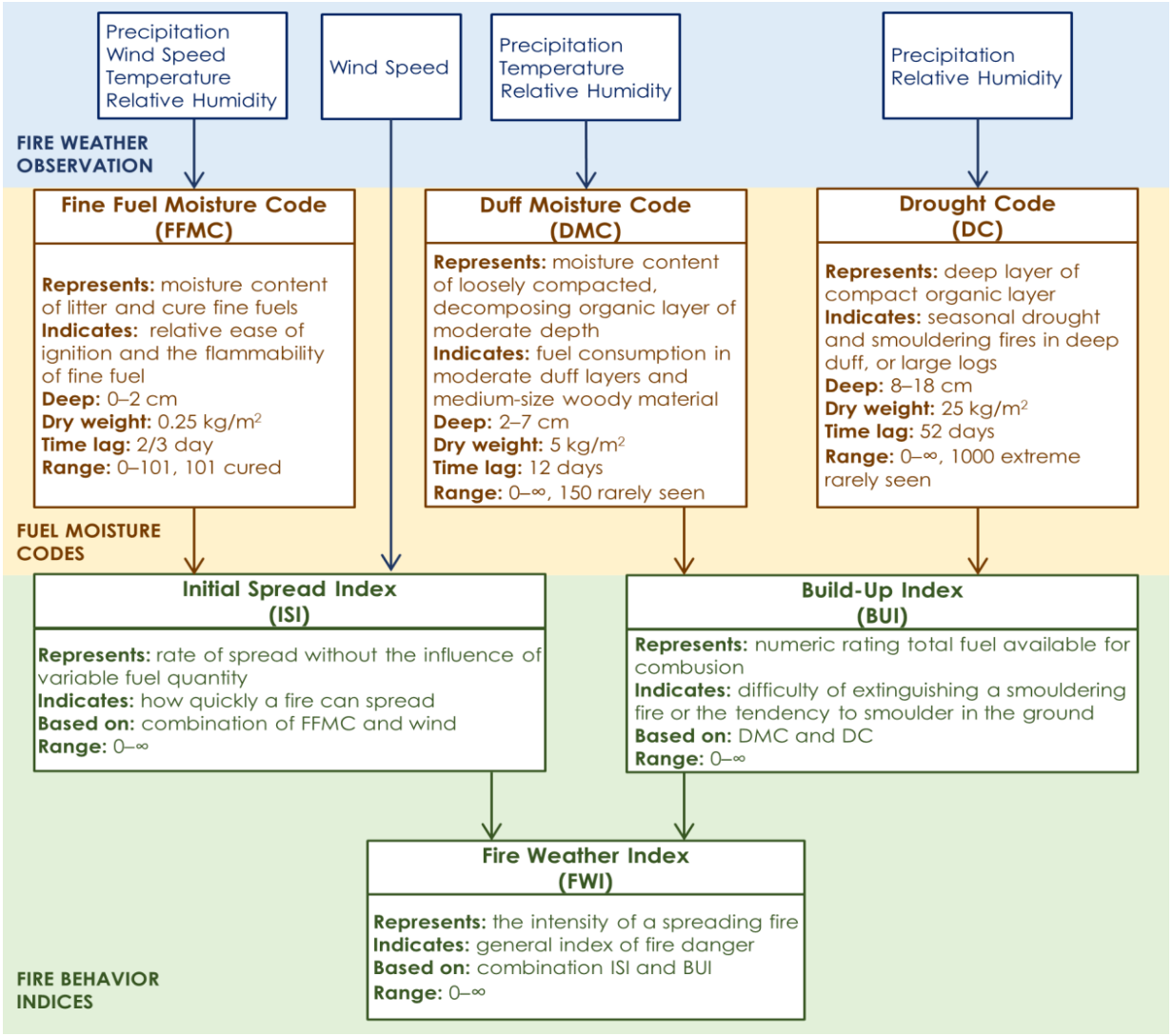


Рисунок заимствован из работы Kudláčková, L., Bartošová, L., Linda, R., Bláhová, M., Poděbradská, M., Fischer, M., Balek, J., Žalud, Z., & Trnka, M. Assessing fire danger classes of the Canadian Fire Weather Index across global environmental zones: A Review. 2024. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.12635490

Предварительная обработка

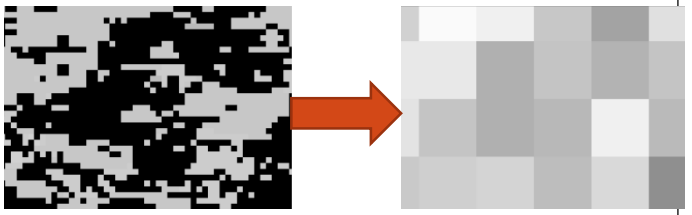
Все пространственные данные приводились к единой регулярной сетке (30′x30′, WGS1984).

Относительная горимость (RBA) характеризовала степень пожарного воздействия:

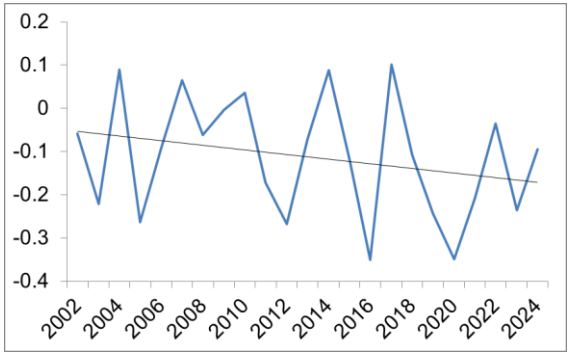
$RBA = 100\% \cdot S_{burned}/S_{larch}$, где S_{burned} – среднегодовая площадь пожаров (га), S_{larch} – площадь лиственничных лесов в пределах ячейки сетки (га).

Для классификации ячейки выходного растра («отпад» или «отсутствие отпада») было использовано пороговое значение 70%.

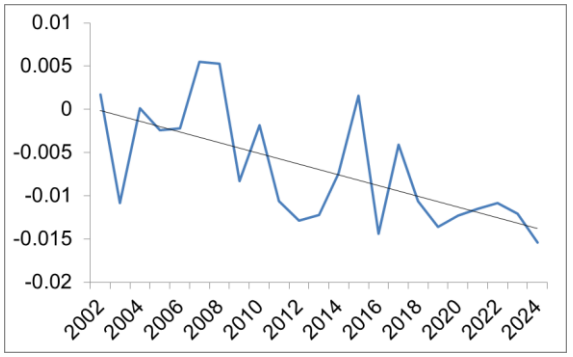
Для климатических переменных были рассчитаны их среднемесячные значения за базовый период с 1985 по 2000 годы. После этого, для каждого месяца (с мая по сентябрь) периода 2001 – 2024 годов рассчитывались аномалии указанных индексов как разность между значением для текущего года и средним значением для базового периода. В анализе использовались метеоданные как за месяц, в котором регистрировался пожар, так и за месяц, предшествующий пожару.



GFC Выходной растр



SPEI



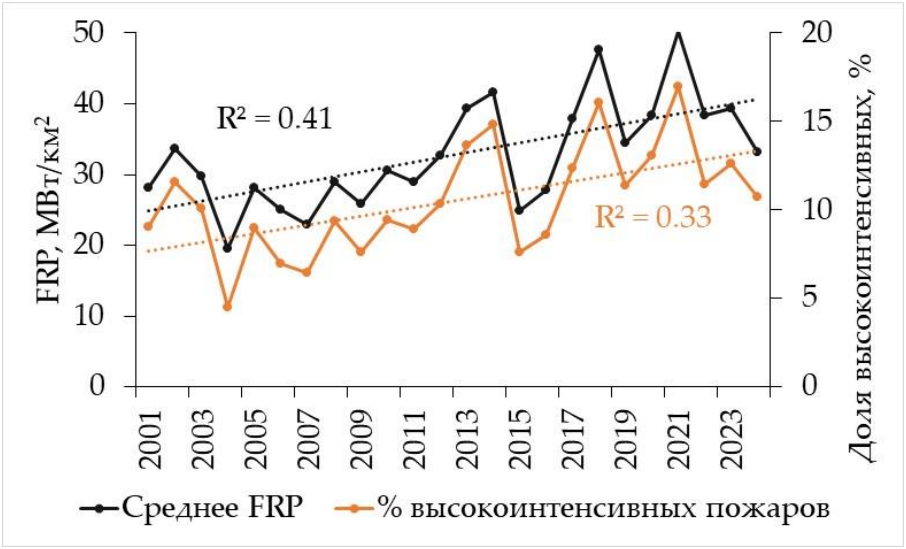
Влажность почвы ($м^3/м^3$)

Динамика пожарного воздействия за 2001 - 2024

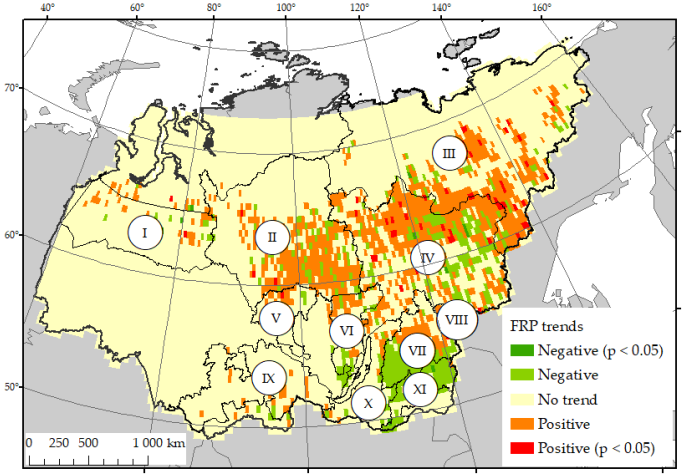
Временной интервал	RBA, %
2001–2005	0.72
2006–2010	0.66
2011–2015	1.77
2016–2020	1.89
2021–2024	1.36
Среднее за период	1.31

За период 2001 – 2024 год относительная площадь пожаров (RBA) в Сибири удвоилась.

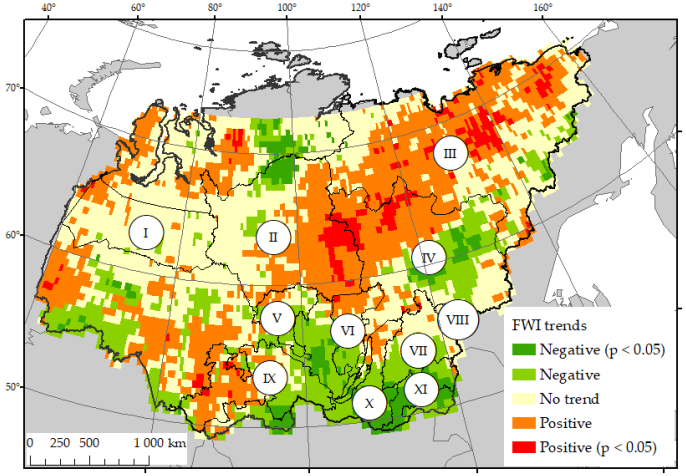
Наблюдался рост как средней FRP (R^2 = 0,41; p < 0,01), так и доли пикселей, соответствующих очагам высокой интенсивности горения (R^2 = 0,33; p < 0,01). В период 2011–2024 гг. наблюдался рост пожарной активности по сравнению с периодом 2001–2010 гг.: средняя FRP увеличилась примерно на 34%, а количество пикселей высокоинтенсивного горения примерно на 44%.



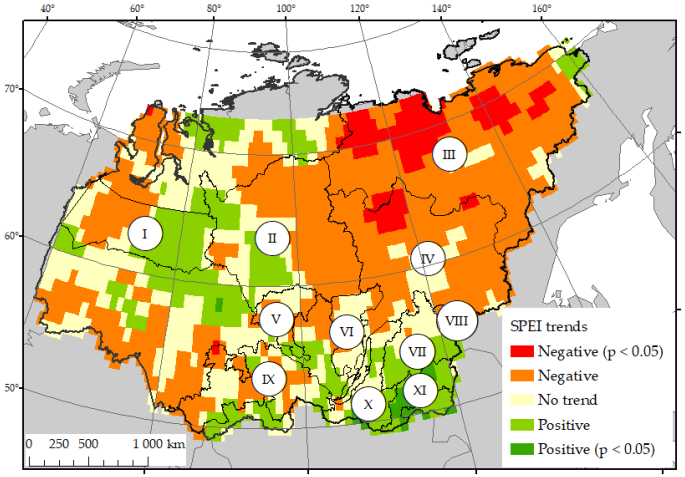
Пространственно-временная динамика метеопеременных и FRP за 2001 - 2024



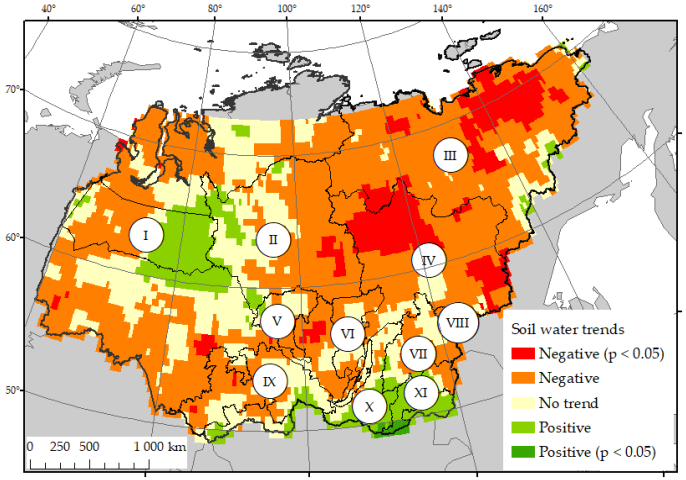
Тренды FRP



Тренды FWI

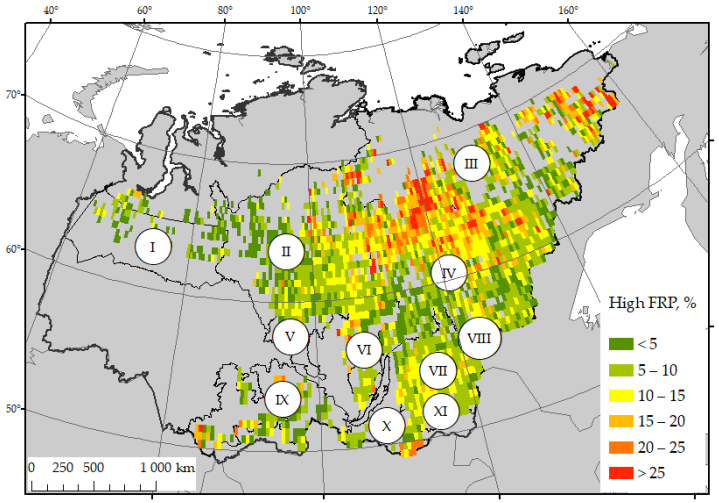


Тренды SPEI

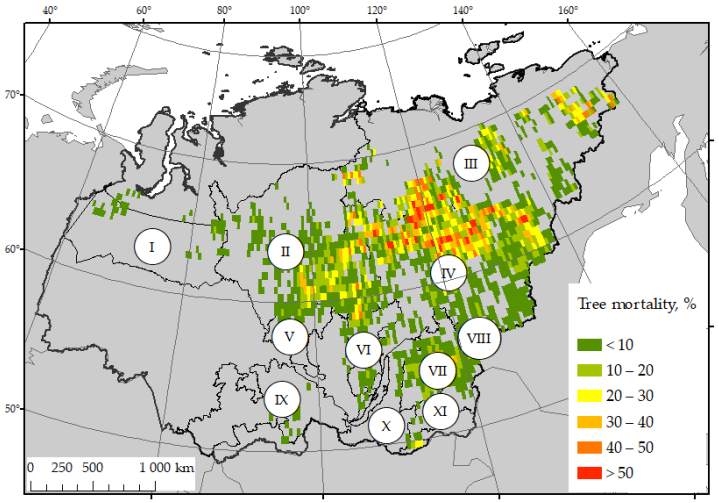


Тренды влажности почвы

Высокоинтенсивные пожары и послепожарный отпад древостоя

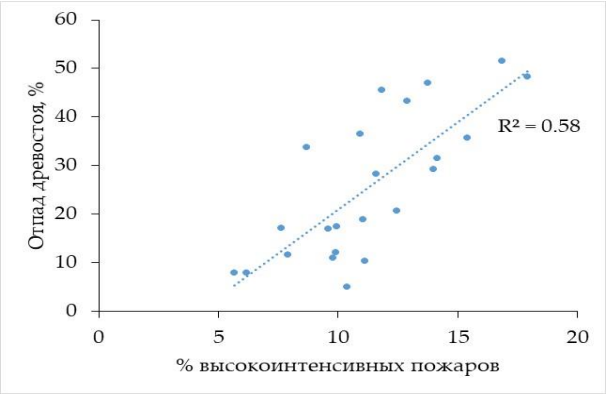


Высокоинтенсивные пожары



Послепожарный отпад древостоя

Наибольшая доля высокоинтенсивных пожаров наблюдалась в центральной и северо-восточной частях Сибири. Пространственное распределение отпада древостоев характеризуется схожей закономерностью.



Зависимость между долей высокоинтенсивных пожаров и отпадом древостоев ($R^2 = 0,58$; $p < 0,05$).

Относительная значимость климатических переменных и индексов пожарной опасности при оценке отпада древостоев

Оценка относительной значимости климатических показателей и индексов пожарной опасности при прогнозировании гибели древостоев после пожара. Анализ проводился с месячным временным шагом и с использованием пространственной сетки 30' × 30'. В качестве исходных данных использовались «аномалии» рассматриваемых показателей, представляющие собой разность между значением показателя в месяц, когда происходил пожар (или в предшествующий месяц), и значением того же показателя в соответствующий месяц согласно «фоновым» данным.

Название переменной	Описание
FFMC_CUR/PREV	Величина аномалии индекса FFMC системы FWI за месяц, в котором регистрировался пожар / предыдущий месяц
DMC_CUR/PREV	Величина аномалии индекса DMC системы FWI за месяц, в котором регистрировался пожар / предыдущий месяц
DC_CUR/PREV	Величина аномалии индекса DC системы FWI за месяц, в котором регистрировался пожар / предыдущий месяц
ISI_CUR/PREV	Величина аномалии индекса ISI системы FWI за месяц, в котором регистрировался пожар / предыдущий месяц
BUI_CUR/PREV	Величина аномалии индекса BUI системы FWI за месяц, в котором регистрировался пожар / предыдущий месяц
FWI_CUR/PREV	Величина аномалии индекса FWI системы FWI за месяц, в котором регистрировался пожар / предыдущий месяц
SPEI_CUR/PREV	Аномалия показателя засушливости SPEI за месяц, в котором регистрировался пожар / предыдущий месяц
T2M_CUR/PREV	Аномалия температуры воздуха за месяц, в котором регистрировался пожар / предыдущий месяц
TP_CUR/PREV	Аномалия количества осадков за месяц, в котором регистрировался пожар / предыдущий месяц
SWVL1_CUR/PREV	Аномалия влажности верхнего слоя почвы за месяц, в котором регистрировался пожар / предыдущий месяц

Анализ значимости признаков

Анализ значимости признаков выполнялся на языке Python (версия 3.11) с использованием библиотеки машинного обучения Scikit-learn (версия 1.3.2).

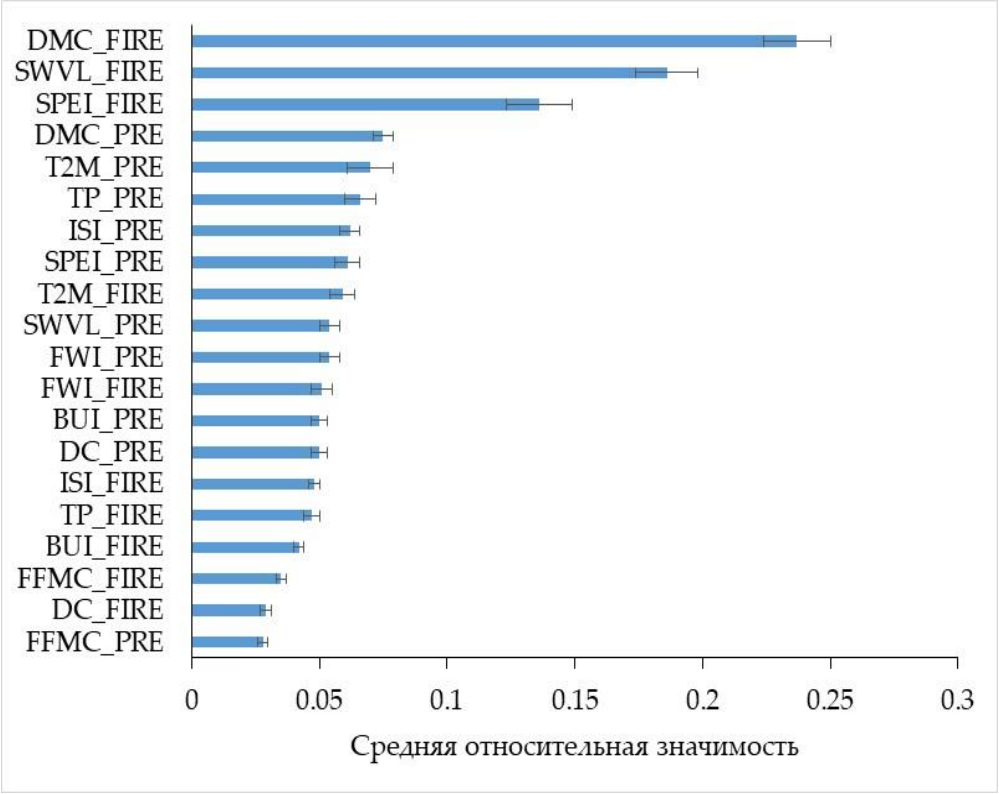
Использовались подходы, основанные на построении ансамблей решающих деревьев. Эти подходы включали метод случайного леса (Random Forest), а также метод градиентного бустинга в реализации библиотек LightGBM и XGBoost.

Значимость признаков оценивалась с использованием метода случайной перестановки значений признаков (функция permutation_importance библиотека Scikit-learn) и анализа влияния на точность регрессии. Если перестановка значений признака приводит к значительному снижению точности регрессии, то данный признак имеет высокую значимость.

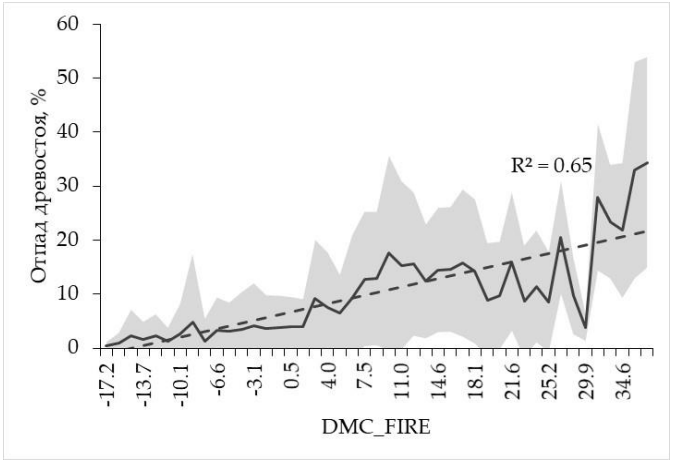
Относительная значимость признаков

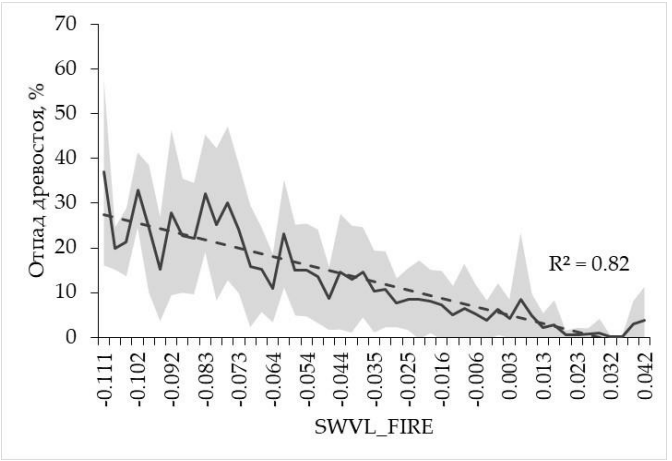
Усредненные показатели относительной значимости признаков для трех построенных моделей (Random Forest, LightGBM и XGBoost).

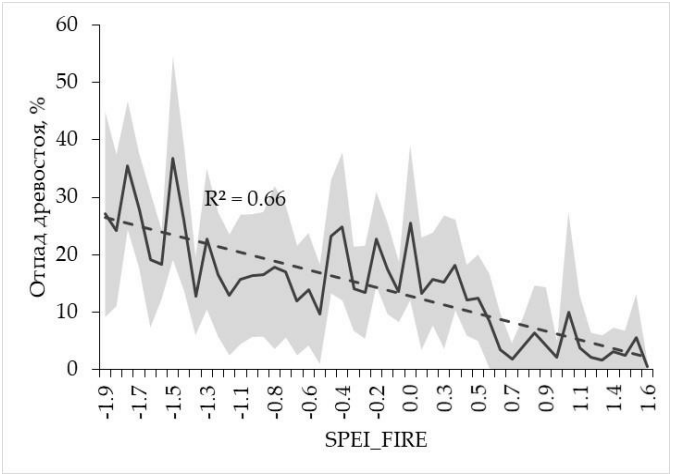
Наиболее значимыми при прогнозировании радиационной мощности и послепожарного отпада древостоя оказались аномалии значений индекса DMC (Duff Moisture Code) канадской системы оценки пожарной опасности, влажности верхнего слоя почвы в месяц, когда регистрировался пожар, а также индекса засушливости SPEI.

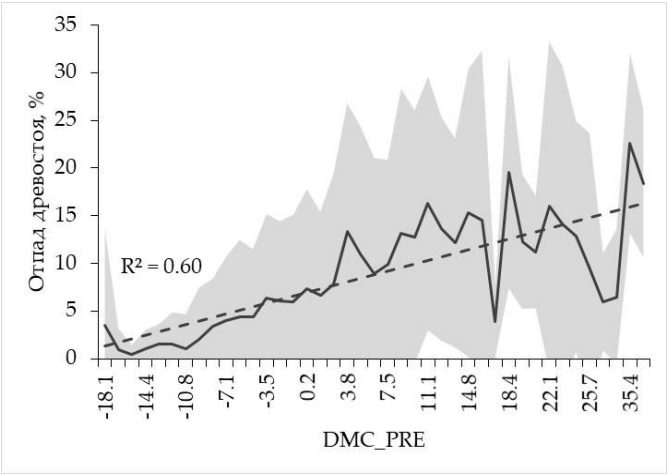


Аномалии признаков и величина отпада древостоя









Величина доли отпада древостоев для 4 аномалий признаков с наибольшей относительной значимостью. Черная линия соответствует среднему значения, серая область – стандартному отклонению

XXIV международная конференция
«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»,
9-13 ноября 2026

Спасибо за внимание!

Работа выполнена в рамках государственного задания Института леса ФИЦ КНЦ СО РАН FWES-2024-0023.