

XXIII Международная конференция
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»

Москва, ИКИ РАН, 10–14 ноября 2025 г.

Дистанционные данные о теплоизлучении от пожаров в оценке степени пожарного воздействия на растительность Сибири

Евгений ПОНОМАРЁВ,
Швецов Е.Г., Забродин А.Н., Пономарёва Т.В.,
Третьяков П.Д., Мальканова А.В., Барабанова В.Р.

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН,
ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН»,
Сибирский федеральный университет

При поддержке гранта Российского научного фонда № 23-14-20007,
<https://rscf.ru/project/23-14-20007/>, Красноярского краевого фонда науки
Обработка данных о пожарах выполнена в рамках государственного задания
№ FWES-2024-0023 (ИЛ СО РАН)



КРАСНОЯРСКИЙ
КРАЕВОЙ
ФОНД НАУКИ

Постановка задачи

В результате климатических изменений в Сибири наблюдается ужесточение пожарных режимов, определяющих повышение степени пожарного воздействия на растительность. На территорию Сибири приходится до 70–90% площадей пожаров.

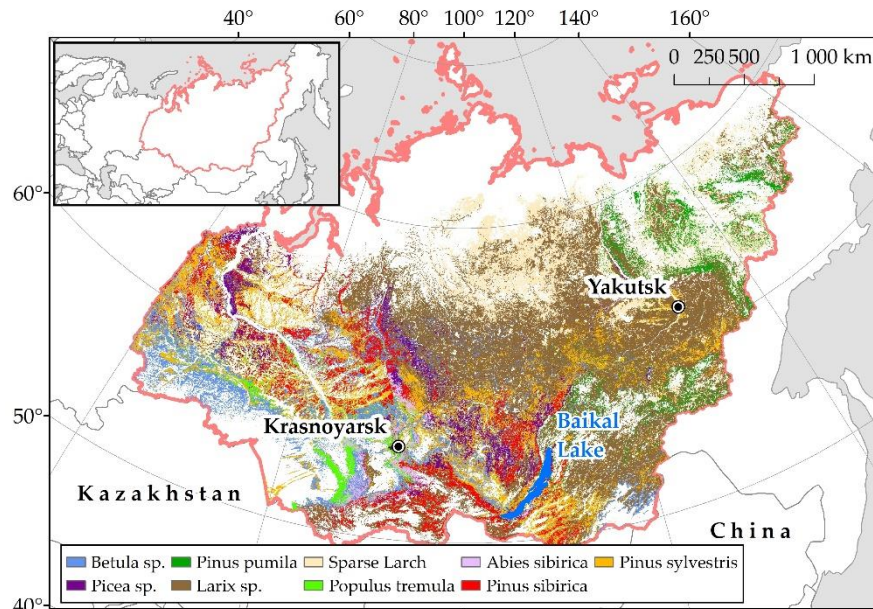
Актуально изучение вариативности энергетических характеристик пожаров в меняющемся климате и уровень пожарного воздействия на доминирующие варианты растительности Сибири.

Дистанционные данные позволяют получать инструментальные измерения теплоизлучения активных зон пожаров.

Цель работы: анализ динамики энергетических характеристик пожаров для оценки пожарного воздействия и послепожарных эффектов в Сибири.



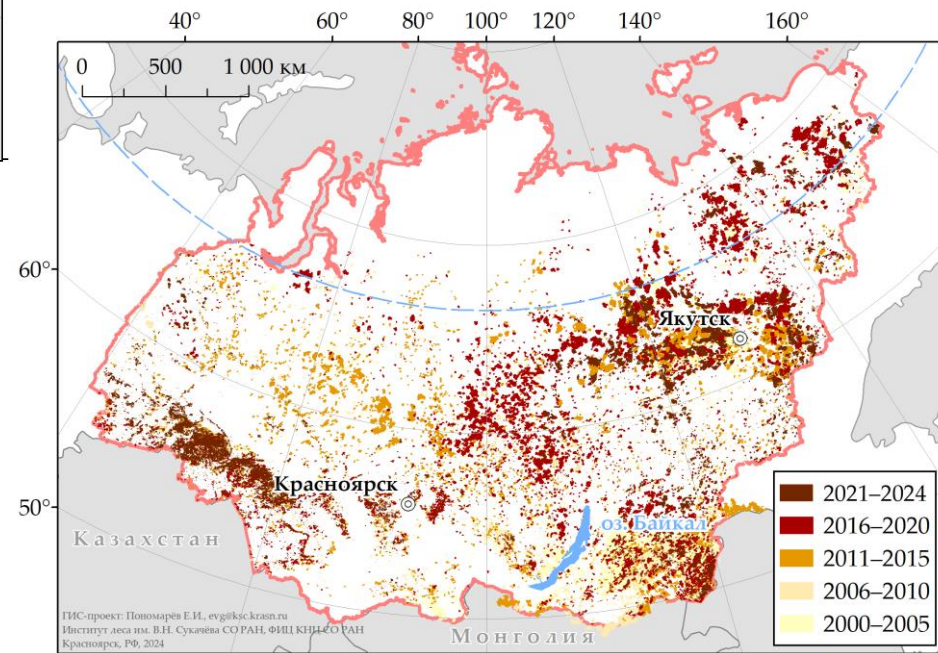
Территория исследований



База данных пожаров Сибири
по данным спутникового
мониторинга **2000–2025** гг.
Институт леса им. В.Н. Сукачева
СО РАН, Красноярск.

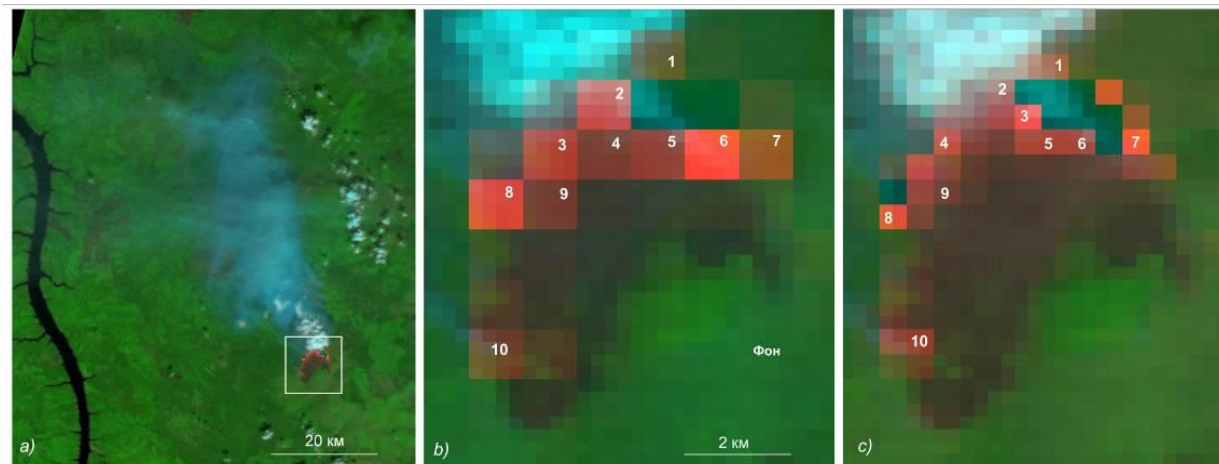
Территория 970 млн га,
Площадь лесов ~600 млн га

Карта растительности.
Информационный ресурс «Вега»
<http://pro-vega.ru/maps/>
ИКИ РАН, Москва



Спутниковые данные о пожарах растительности

- I Детектирование пожара по материалам Terra и Aqua/MODIS
Аналог стандартного продукта MOD14

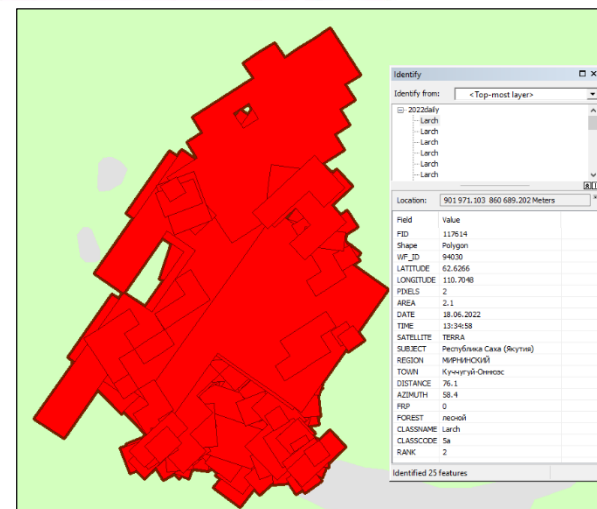


- II Обработка и архивация сведений
об ЛП в базе данных

Срок наблюдений: **1996–2025** гг.;

Объем данных: **>7×10⁶** записей;

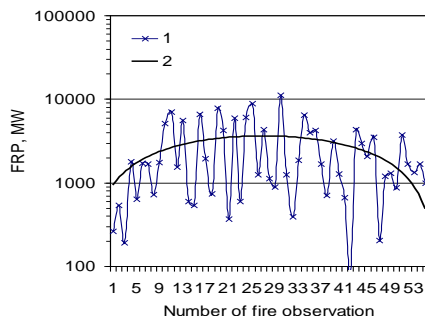
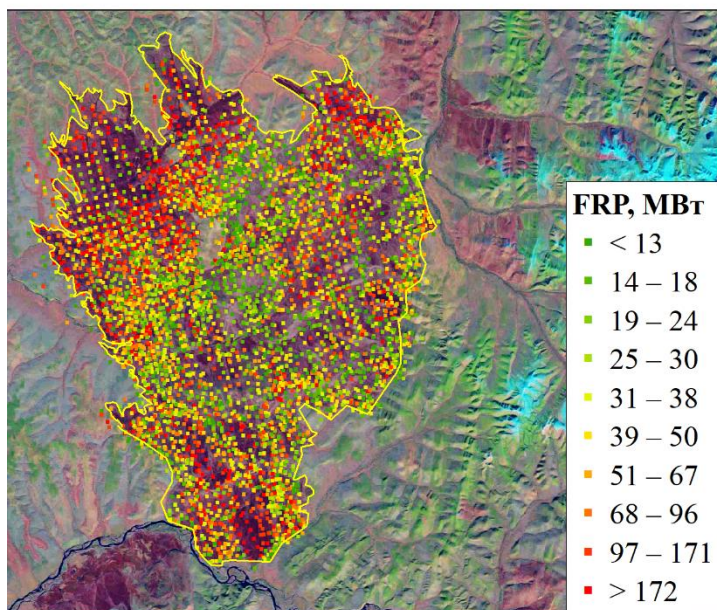
Формат представления: векторные ГИС-слои,
атрибутивная информация



Мощность теплоизлучения

Fire Radiative Power (FRP)

Продукт MOD14/MYD14, колл. 6: <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>



Динамика FRP в
границах пожара

$$FRP = \frac{S \times \sigma}{a} (L_4 - \overline{L_4})$$

где L_4 и $\overline{L_4}$ – энергетические яркости ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}$) термически активного пикселя (цели) и фона в канале $\lambda = 3.929\text{--}3.989$ мкм;

$$\sigma = 5.6704 \times 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \times \text{К}^{-4}$$

постоянная Стефана–Больцмана;
 S – площади пикселя;

$$a = 3.0 \times 10^{-9} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \times \text{ср}^{-1} \times \text{мкм}^{-1} \times \text{К}^{-4}$$

эмпирический коэффициент

Исходные данные

MCD64A1



Расположение и датировка гарей

MOD14



Радиационная мощность пожаров

Векторная карта
растительности



Преобладающие типы древостоев

Продукт глобального
изменения лесов



Участки отпада древостоев

База ERA5 Land



Климатические данные и
индекс засушливости SPEI

База Global FWI



Индексы канадской системы
оценки пожарной опасности
по условиям погоды

Совокупность анализируемых параметров

1. Мощность теплоизлучения по FRP (*Fire Radiative Power*)

$FRP_{\text{пикс}}$ – среднее значение в пикселе пожара;

$FRP_{\text{инт}}$ – сумма мощности теплоизлучения от всех пикселей пожаров;

$FRP_{\text{инт}} \geq FRP_{\text{пикс}} + 2SD$ – спорадические экстремумы для выборки пожаров

2. Степень пожарного воздействия по NBR (*Normalized Burn Ratio*)

$$NBR = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$$

$$dNBR = NBR_{\text{prefire}} - NBR_{\text{postfire}}$$

$NIR: \lambda = 0.845 - 0.885$ мкм, $SWIR: \lambda = 2.100 - 2.300$ мкм

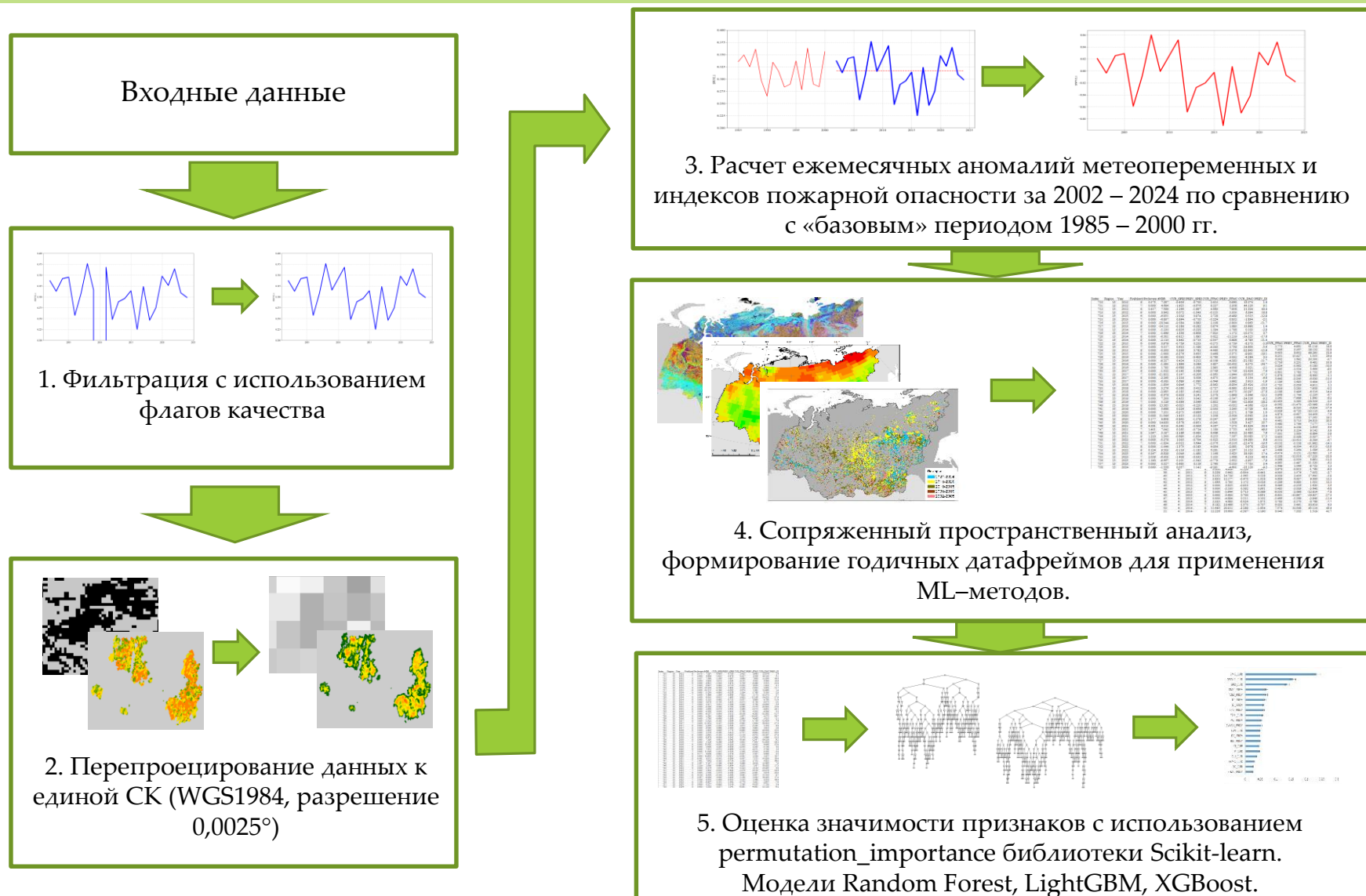
$NBR_{\text{prefire}}, NBR_{\text{postfire}}$ – данные до- и послепожарной съёмки

3. Тепло обеспеченность в сезоне по ГТК (*Гидротермический коэффициент*)

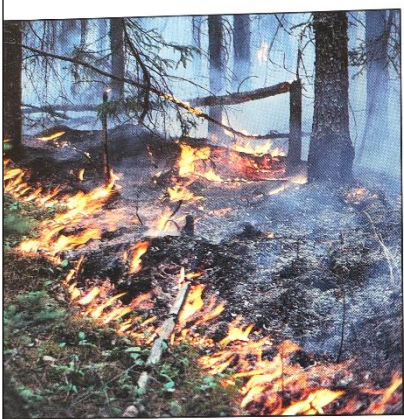
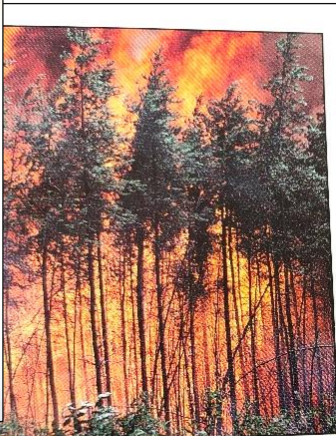
$$ГТК = 10 \times \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{t_i}$$

R_i – осадки, мм; t_i – температура воздуха, °C; i – дни сезона с $t > +10^\circ\text{C}$

Обработка данных/значимость факторов влияния



Калибровка ЛП по натурным данным (Канада)



Experimental Fire #: 8/76

Fire Weather Observations	
Dry-bulb temperature	25°C
Relative humidity	40%
10-m open wind	15 km/h
Days since rain	2
FWI System Fuel Moisture Codes	
Fine Fuel Moisture Code (FFMC)	89.7
Duff Moisture Code (DMC)	50
Drought Code (DC)	245

Fire Behavior Characteristics	
Head fire rate of spread	16.2 m/min
Fuel Consumption	3.44 kg/m ²
Frontal fire intensity	16718 kw/m
Type of Fire: Fully-developed crown fire	

July 9, 1976

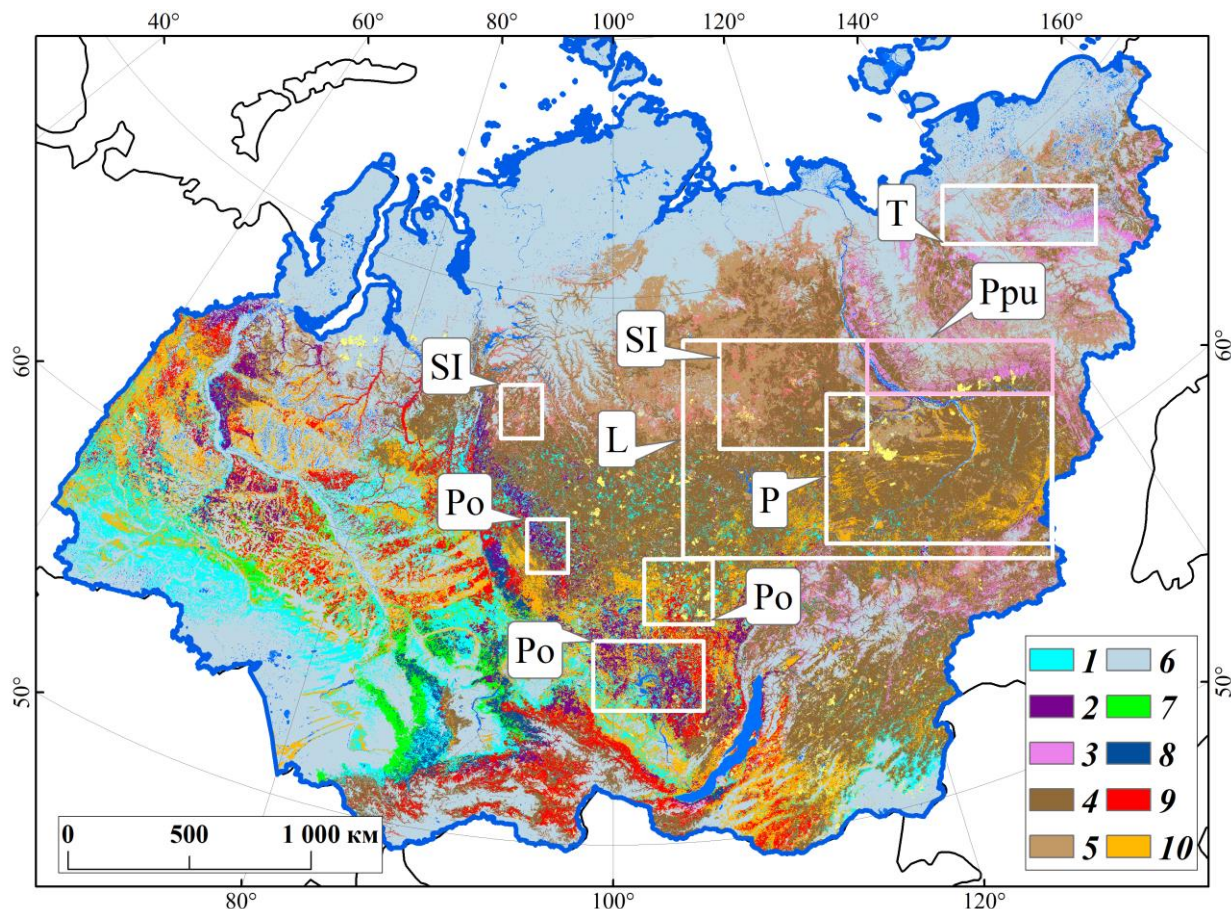
System Fire Behavior Indices	
Head Index (ISI)	8.7
Buildup Index (BUI)	67
Fire Weather Index (FWI)	23

FWI System Fire Behavior Indices	
Initial Spread Index (ISI)	7.7
Buildup Index (BUI)	28
Fire Weather Index (FWI)	14

Fire Behavior Characteristics	
Head fire rate of spread	1.6 m/min
Fuel Consumption	0.62 kg/m ²
Frontal fire intensity	298 kw/m

B. Stocks, G. Hartley, 1995
Great Lakes Forestry Center, Ontario

География выборки данных о пожарах Сибири

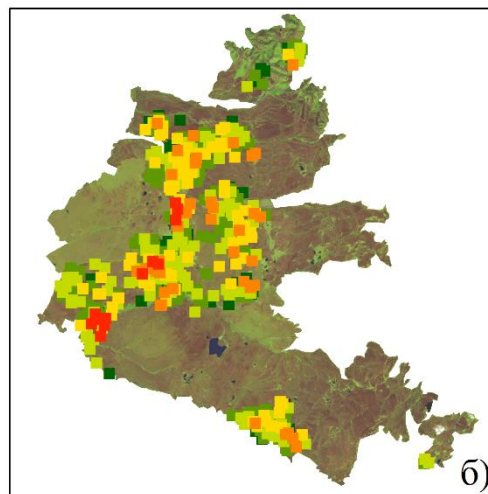
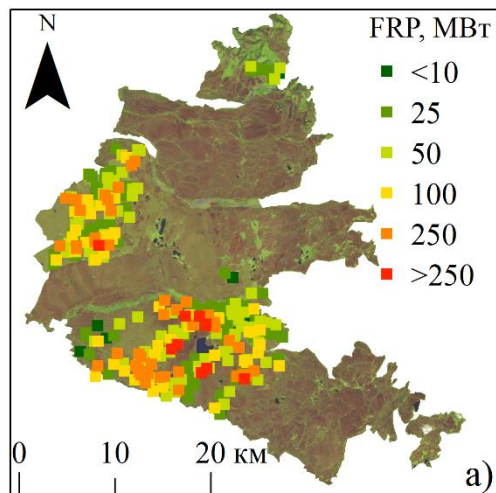


- 1 – Береза (*Betula spp.*), 2 – Ель (*Picea obovata*),
3 – Кедровый стланик (*Pinus pumila*),
4 – Лиственница (*Larix sibirica*),
5 – Лиственница редколесья (*Sparse larch*),
6 – Тундра (*Tundra vegetation*),
7 – Осина (*Populus tremula*),
8 – Пихта (*Abies sibirica*),
9 – Кедр (*Pinus sibirica*),
10 – Сосна (*Pinus sylvestris*)

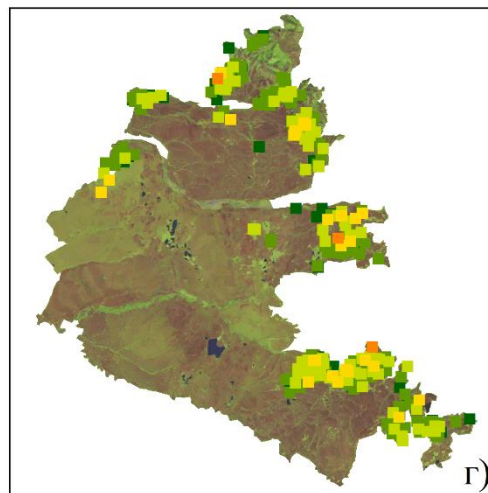
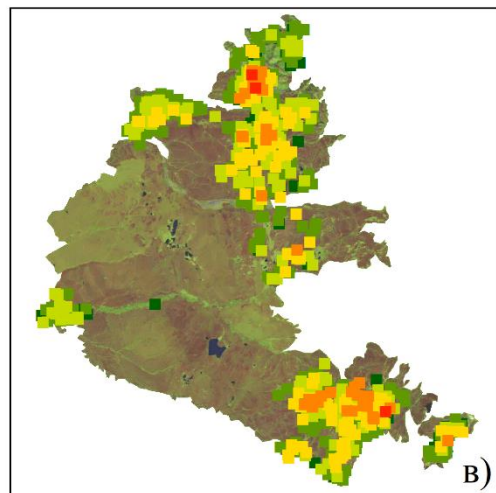
Выборка послепожарных полигонов:

L, SL – Лиственница, редколесья (*Larix sibirica*, *Sparse larch*), P – Сосна (*Pinus sylvestris*), Psi – Кедр (*Pinus sibirica*), Ppu – Кедровый стланик (*Pinus pumila*), Po – Ель (*Picea obovata*), T – Тундровая растительность

Динамика FRP в границах полигона пожара



Подекадная (10 дней)
вариативность индекса
FRP
в границах
зафиксированного
пожара

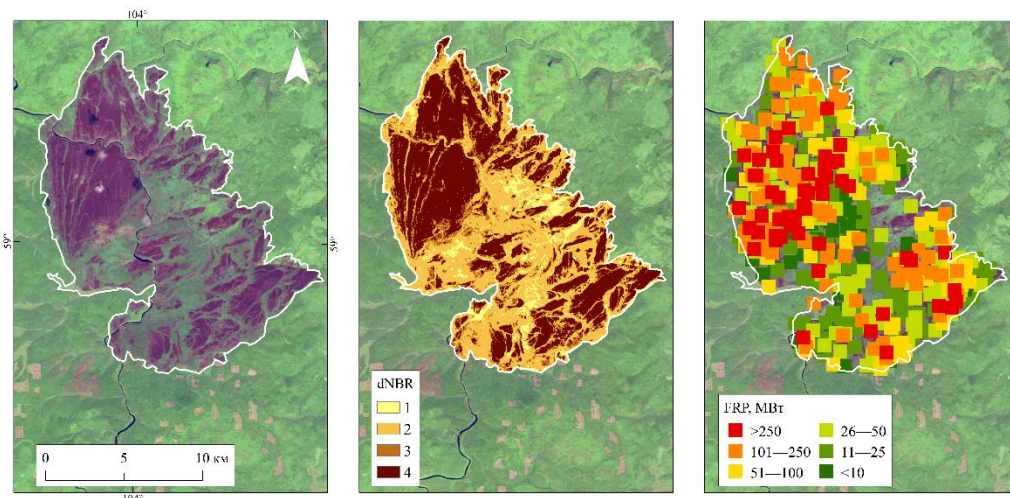


Обобщённая статистика FRP для Сибири

Тип растительности	FRP _{пикс} (МВт)	FRP _{инт} (×10 ³ МВт)	σ, (×10 ³ МВт)	Экстремум FRP _{инт'} (×10 ³ МВт)
Лиственница	82±48	350	260	1000
Лиственничные редколесья	71±34	400	200	120
Сосна	69±37	35	10	140
Ель	62±65	15	10	30
Сосна сибирская (кедр)	42±20	20	5	80
Кедровый стланик	57±10	65	10	210
Тундра	51±7	70	26	200

Δ =	15 — 100 %	500 — 1700%	400 — 1000%
-----	------------	-------------	-------------

FRP vs степень пожарного воздействия

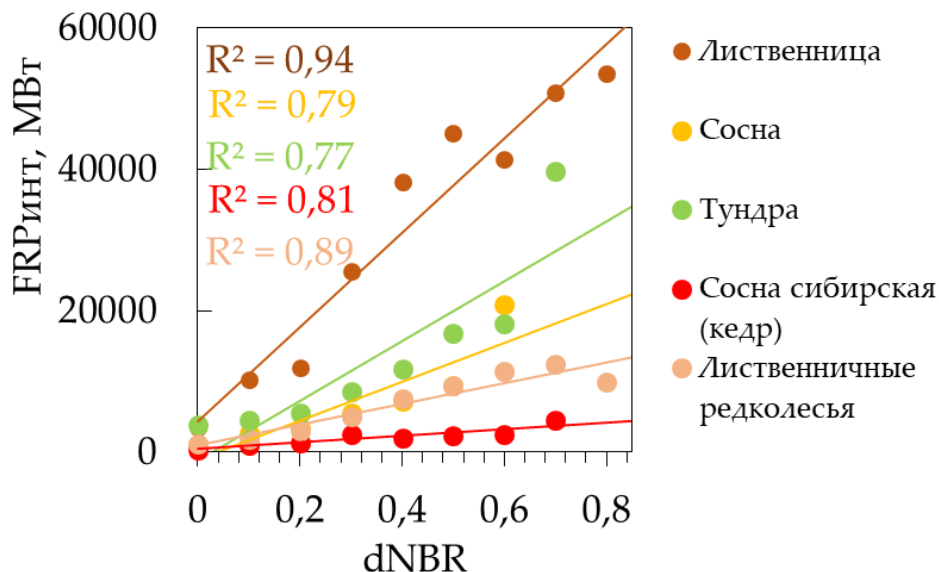


Пороговая классификация
пожарного воздействия по
dNBR:
от <0.099 (слабонарушенные
участки)
до >0.66 (высокая степень
воздействия)

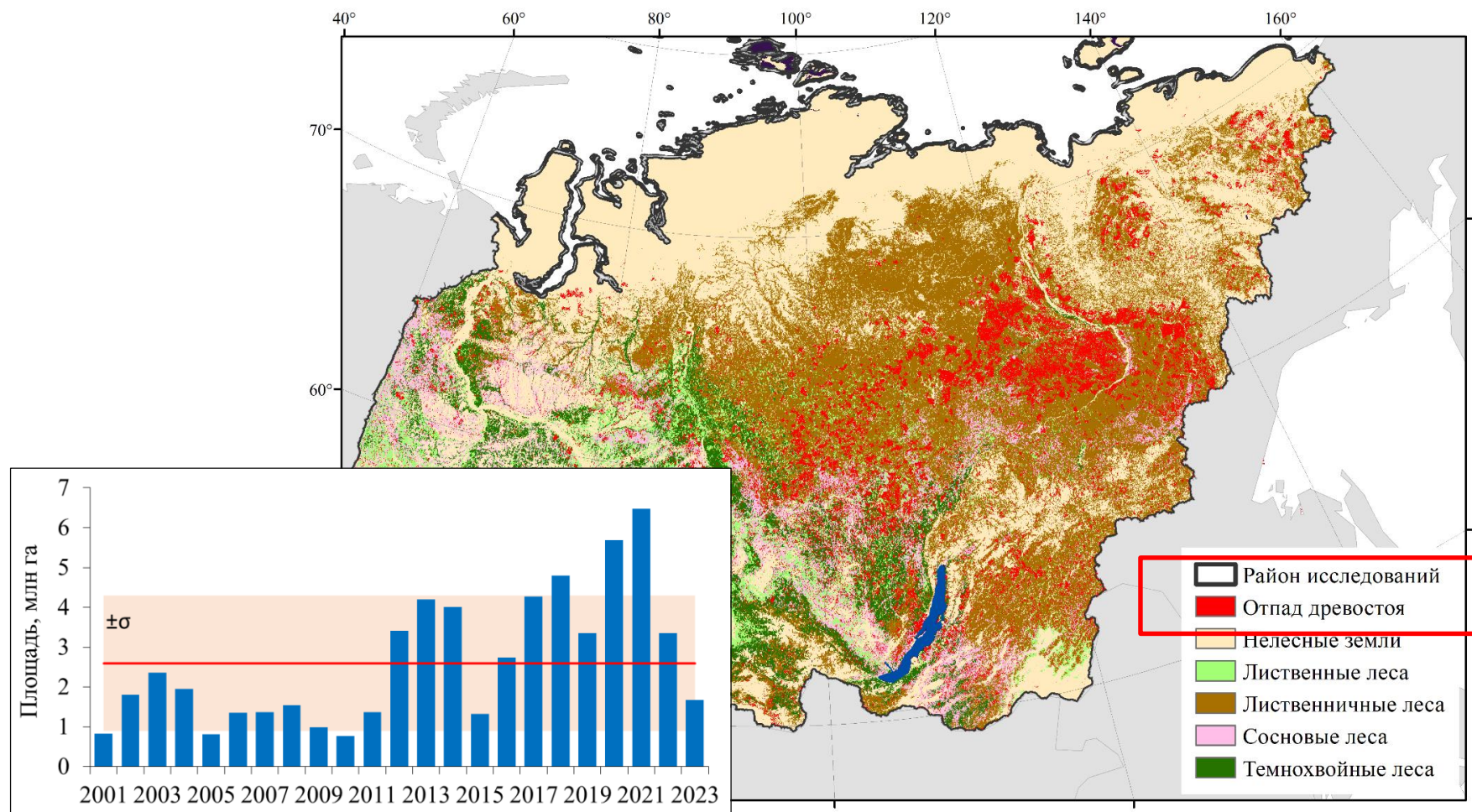
Линейная связь между индексами
dNBR и FRP:

$R^2 = 0.75$ для всей выборки пожаров;

$R^2 = 0.67-0.94$ – с учётом вариации
по древостоям



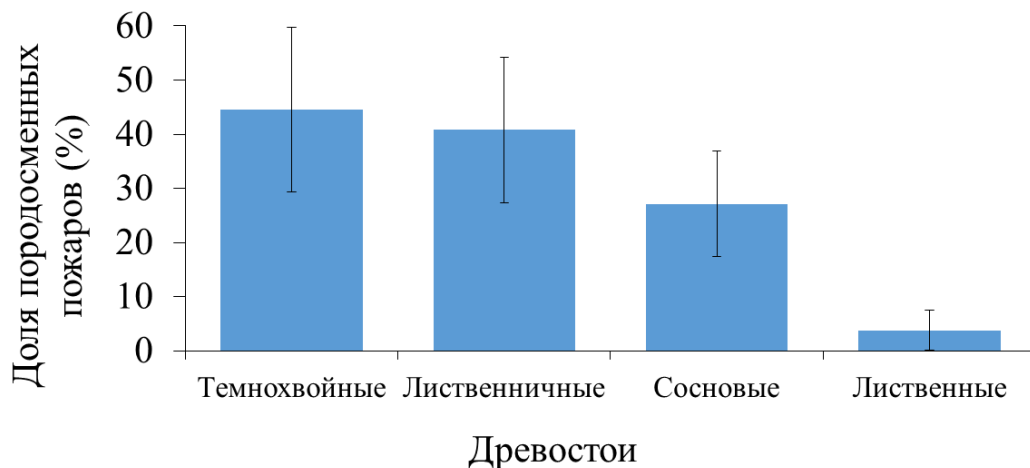
Данные сервиса контроля потери древостоев



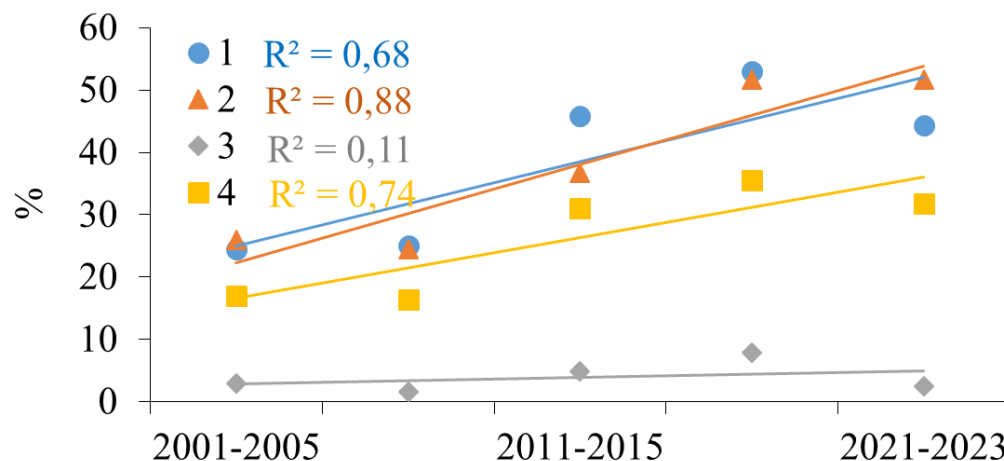
Global Forest Change (*Hansen et al., 2013*)

<https://glad.earthengine.app/view/global-forest-change>

Породосменные пожары Сибири



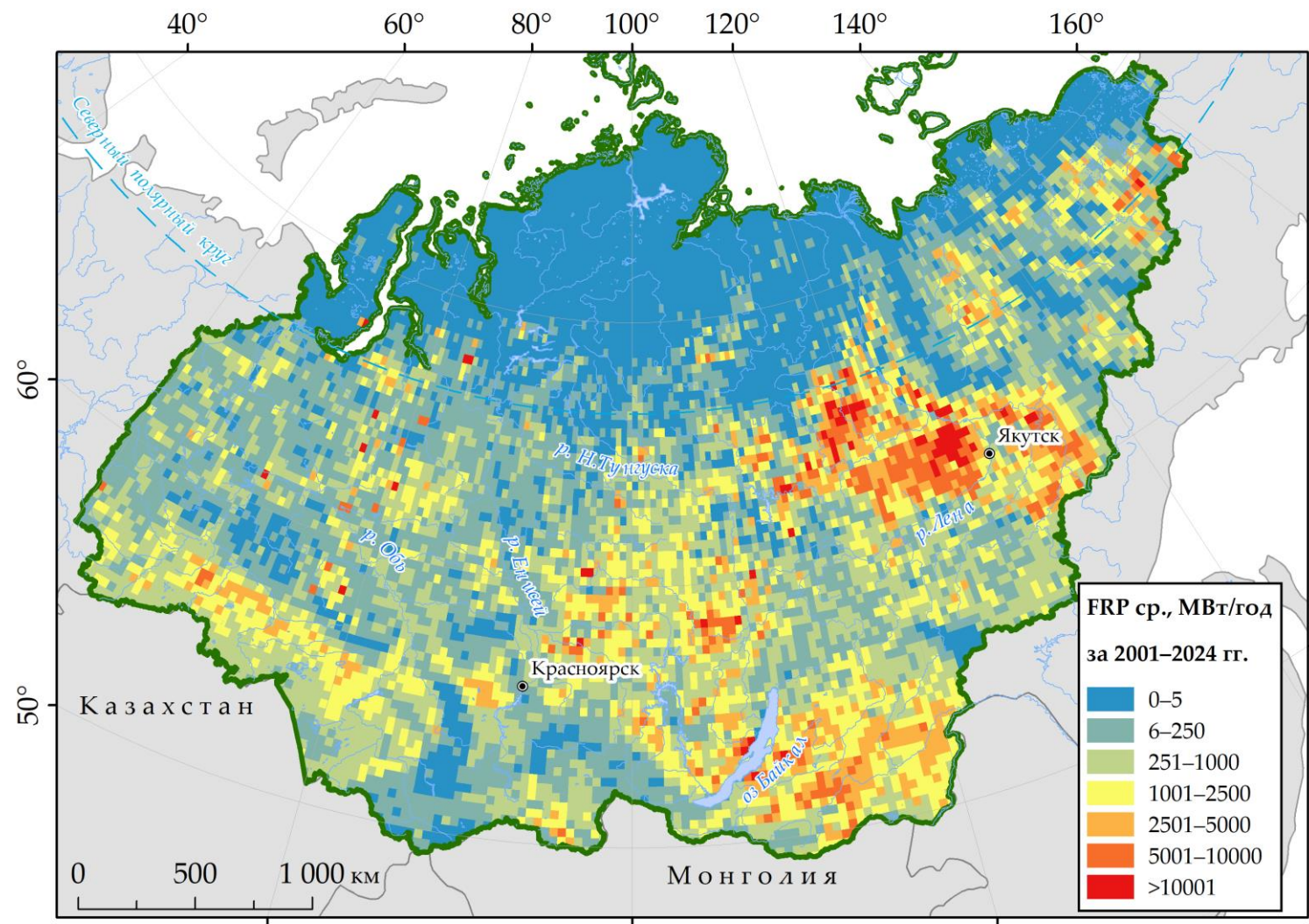
20–90% ежегодная доля породосменных пожаров в статистике **Global Forest Change**



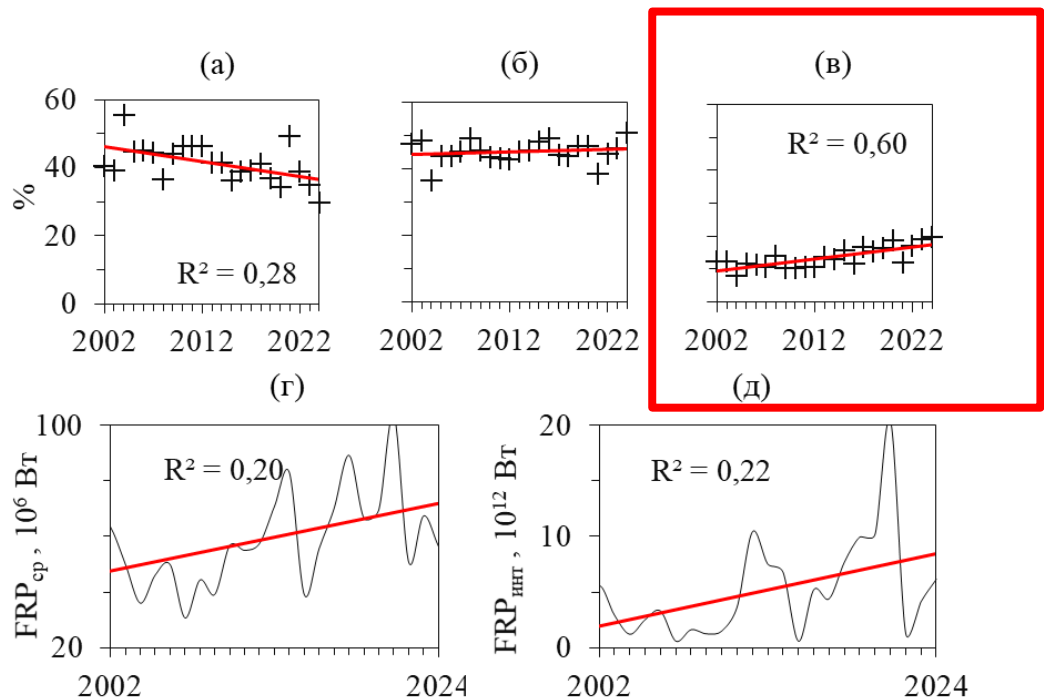
Положительная динамика доли площадей породосменных пожаров относительно общей статистики пожаров на интервале 2001 — 2023 гг.

1 – темнохвойные, 2 – лиственничные, 3 – лиственные, 4 – сосновые

Интенсивность пожаров (2001-2024 гг.)



Пожары высокой интенсивности

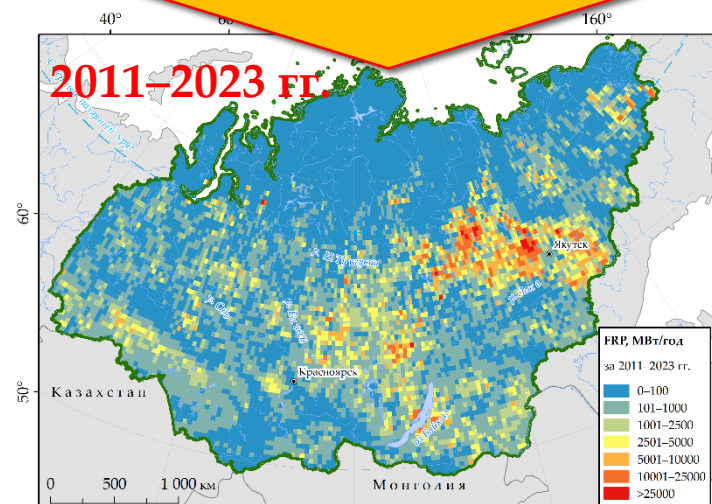
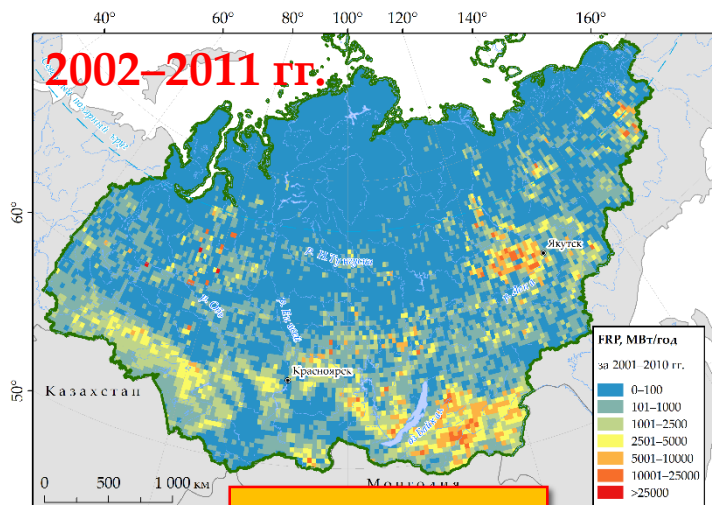


Площади пожаров высокой интенсивности
(млн га/год):

0.63 \pm 0.31 – в 2002–2011 гг.;

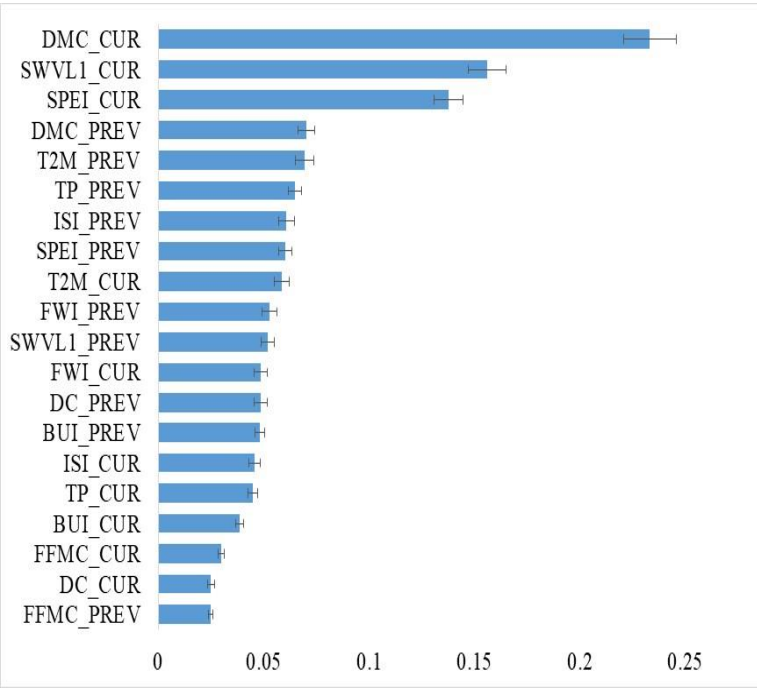
1.70 \pm 0.49 – в 2012–2019 гг.;

2.50 \pm 0.92 – в 2020–2023 гг.

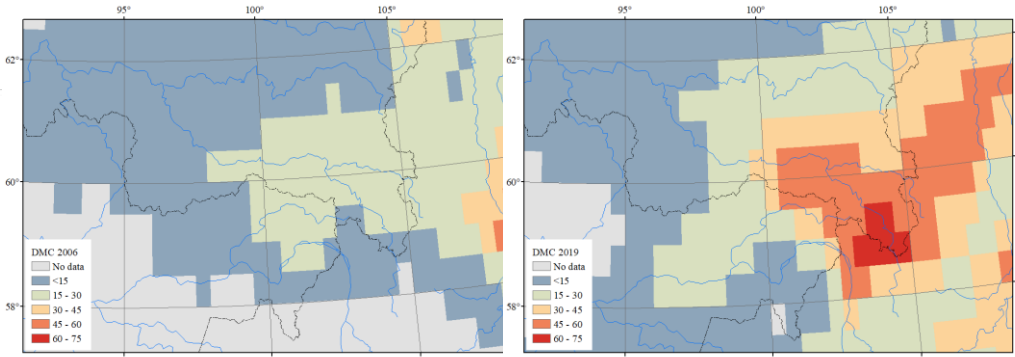


Связь с климатическими факторами

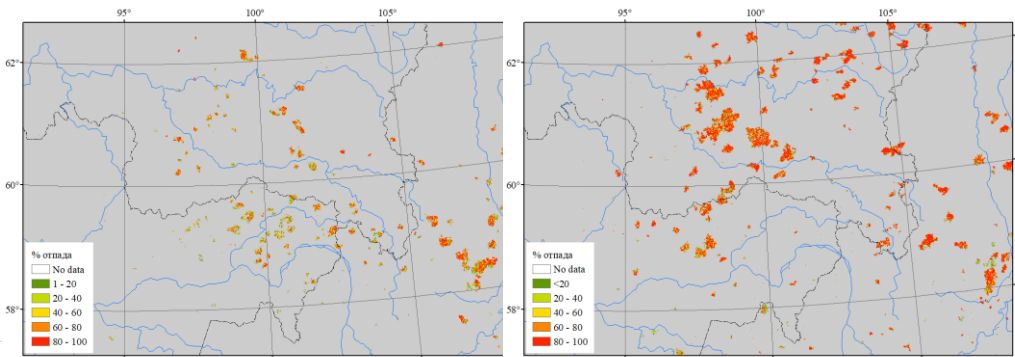
Значимость факторов влияния
на мощности теплоизлучения
и послепожарные отпады древостоя



Максимальная относительная значимость:
– Duff Moisture Code (DMC),
– влажность верхнего слоя почвы,
– индекс засушливости SPEI

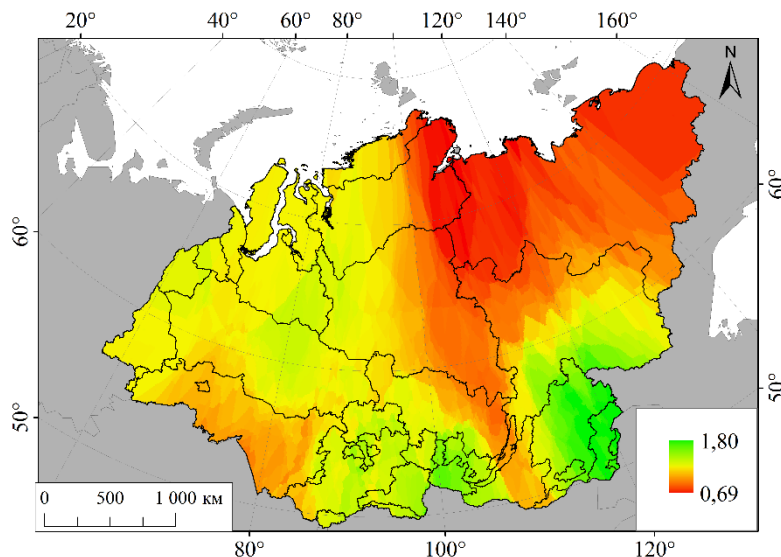


Вариативность индекса Duff Moisture Code (DMC)



Вариативность зон локализации
породосменных пожаров

Климатические факторы



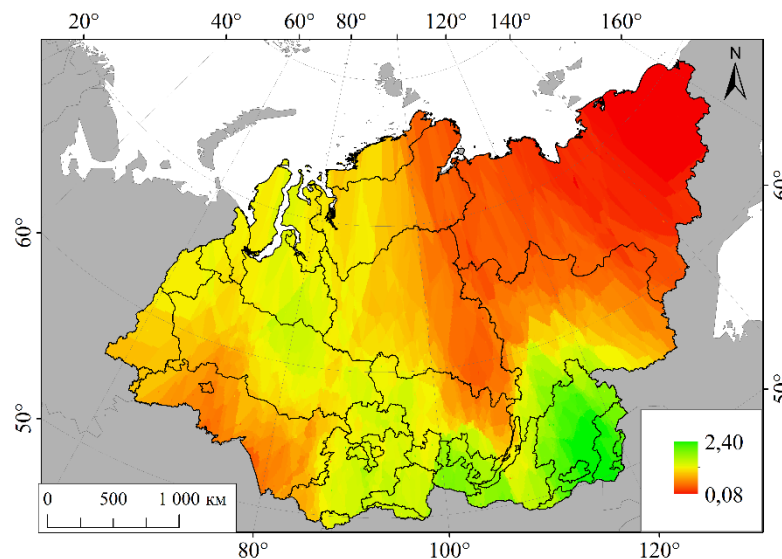
Экстраполяция на территорию Сибири современного уровня тепло-влажнообеспеченности по ГТК

Проекция ГТК на **2030 г.** в рамках современных климатических трендов

Связь FRP и гидротермического коэффициента ГТК:

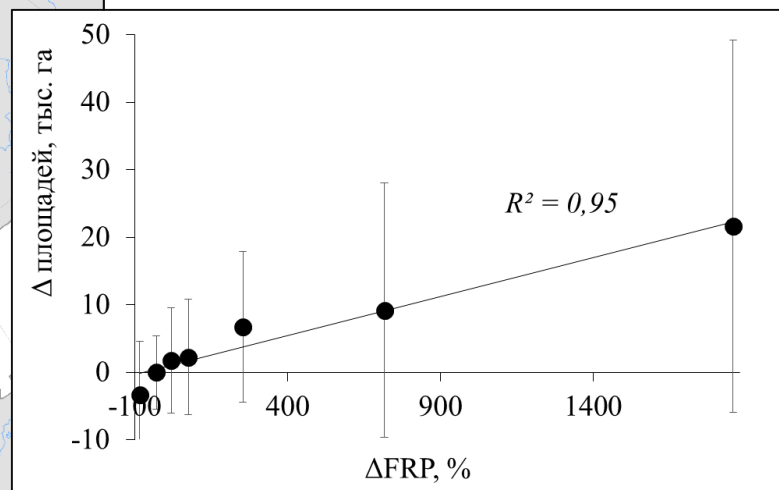
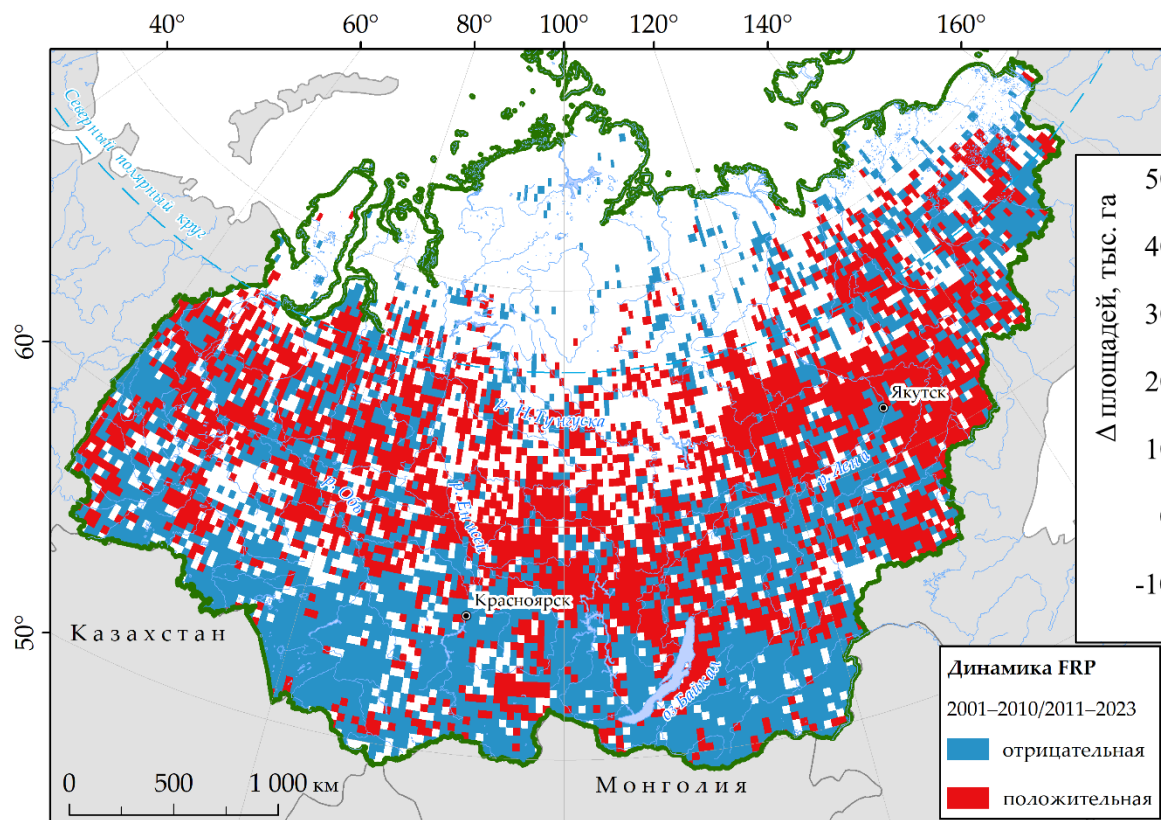
$$r = -0.5 \quad (p < 0.05)$$

Связь FRP и показателя влагосодержания горючих материалов ПВ-1: $r = 0.7 \quad (p < 0.05)$



Пространственная динамика интенсивности

Экстраполяция в кластерах регулярной сетки 20'×30' интегрального FRP на интервалах 2001–2010 г. и 2011–2024 гг.



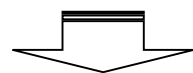
Зависимость доли породосменных пожаров от динамики FRP

Положительная динамика на **~30%** территории Сибири; **21–56%** – в арктической зоне

FRP в оценке пожарных эмиссий

Входные параметры по
Seiler, Crutzen, 1980

Площадь пожаров (м²)
коэффициент полноты сгорания (β)
запас ЛГМ (кг/м²),
углеродная фракция (г/кг)



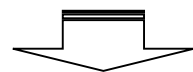
$$C = A \times B \times CE \times \beta$$

Коэффициент полноты сгорания (β) и сгорающий запас растительных горючих материалов (B) рассматриваются, как константы для данных условий

Seiler, W., Crutzen, P.J. 1980 Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere from biomass burning // *Clim. Change*. 1980, 2, 207–247.
<https://doi.org/10.1007/BF00137988>

С учётом интенсивности по
Ponomarev et al. 2019, 2021

Оценка теплоизлучения (FRP)
активной зоны /
классификация
интенсивности



$$C = A (FRP_i) \times \beta_i (FRP_i) \times B_i (FRP_i) \times CE$$

- 1) Учет специфики горения в лесах Сибири
- 2) Адаптированная оценка массы сгорающих ЛГМ
- 3) Уточненные оценки прямых пожарных эмиссий (Тг С/год)

Патент на изобретение, 2021
«Способ расчета прямых пожарных эмиссий углерода с учетом пороговой классификации интенсивности пожара...», RU 2755936 C1



Тренды удельных эмиссий (т/га)

Площади пожаров (млн га) низкой (НИ), средней (СИ) и высокой (ВИ) интенсивности и среднемноголетние объёмы эмиссий для Сибири

Период	Площадь, млн га			С, 10 ⁶ т/год
	НИ	СИ	ВИ	
2002–2011	2.3 ± 1.5	2.5 ± 1.8	0.6 ± 0.4	59.7
2012–2019	3.4 ± 3.0	3.6 ± 3.0	1.4 ± 0.5	136.6
2020–2023	6.6 ± 2.9	6.9 ± 2.4	2.5 ± 1.0	296.0

$$A \times x = B \quad A = \begin{pmatrix} 2.3 & 2.5 & 0.6 \\ 3.4 & 3.6 & 1.4 \\ 6.6 & 6.9 & 2.5 \end{pmatrix}, \quad x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 59.7 \\ 136.6 \\ 296.0 \end{pmatrix}$$

Период	Удельные эмиссии, т/га		
	x ₁ (НИ)	x ₂ (СИ)	x ₃ (ВИ)
2002–2011	9.0	12.0	15.0
2012–2019	10.0	12.4	20.3
2020–2023	10.0	14.5	38.8



Выводы

1. Рост породосменных пожаров обусловлен значимым **приращением доли горения высокой интенсивности**. Положительная динамика высокоинтенсивных пожаров характерна для **~30%** территории Сибири, **21–56%** – в арктической зоне; **коррелирует** с трендами метеопоказателей (теплообеспеченность).
2. Связь между **степенью пожарного воздействия** (по dNBR) и FRP аппроксимирует линейная функция **$R^2=0.67-0.83$** ($p<0.05$). Степень пожарного воздействия пропорциональна объёмам сгорающей биомассы, **повышение доли высокоэнергетических пожаров определяет рост эмиссий/удельных эмиссий**.
3. Прирост потери древостоев Сибири в зависимости от диапазонов изменения радиационной мощности пожаров характеризует **линейная связь** ($R^2 = 0.95$, $p<0.01$). Послепожарные потери составляют от **20% до 90%** суммарных потерь древостоев, отражённых в материалах сервиса Global Forest Change.

Публикации по теме



Ponomarev E.I., Yakimov N.D., Ponomareva T.V., Yakubailik O.E., Conard S.G.
Current Trend of Carbon Emissions from Wildfires in Siberia // **Atmosphere**, 2021, 12(5), 559

Ponomarev E., Zabrodin A., Ponomareva T. Classification of Fire Damage to Boreal Forests of Siberia in 2021 Based on the dNBR Index // **Fire**, 2022, 5(1), 19



Ponomarev E.I., Zabrodin A.N., Shvetsov E.G., Ponomareva T.V.
Wildfire Intensity and Fire Emissions in Siberia // **Fire**, 2023, 6(7), 246

Пономарев Е.И. Способ расчета прямых пожарных эмиссий углерода с учетом пороговой классификации интенсивности пожара... // **Патент на изобретение**, 2021, RU 2755936 C1

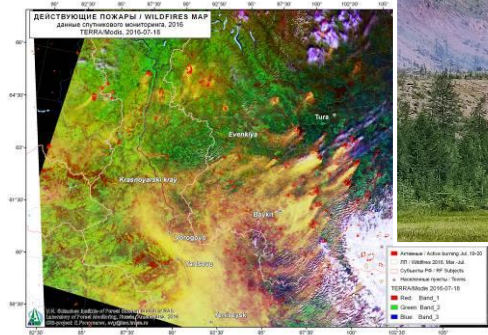


Пономарёв Е.И. Пространственно–временное распределение показателей горимости растительности Сибири... // **База данных**, 2024, № 2024622955, бюл. №7



XXIII Международная конференция
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»
Москва, ИКИ РАН, 10–14 ноября 2025 г.

*Спасибо
за внимание!*



При поддержке гранта Российского научного фонда № 23-14-20007,
<https://rscf.ru/project/23-14-20007/>, Красноярского краевого фонда науки
Обработка данных о пожарах выполнена в рамках государственного задания
№ FWES-2024-0023 (ИЛ СО РАН)



КРАСНОЯРСКИЙ
КРАЕВОЙ
ФОНД НАУКИ