

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.

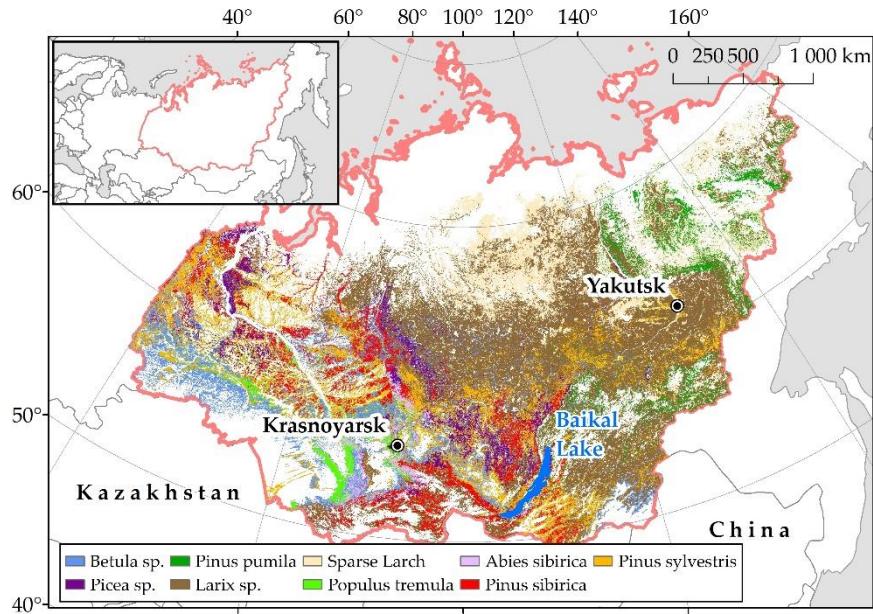
Актуально изучение вариативности энергетических характеристик пожаров в меняющемся климате и уровень пожарного воздействия на доминирующие варианты растительности Сибири.

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

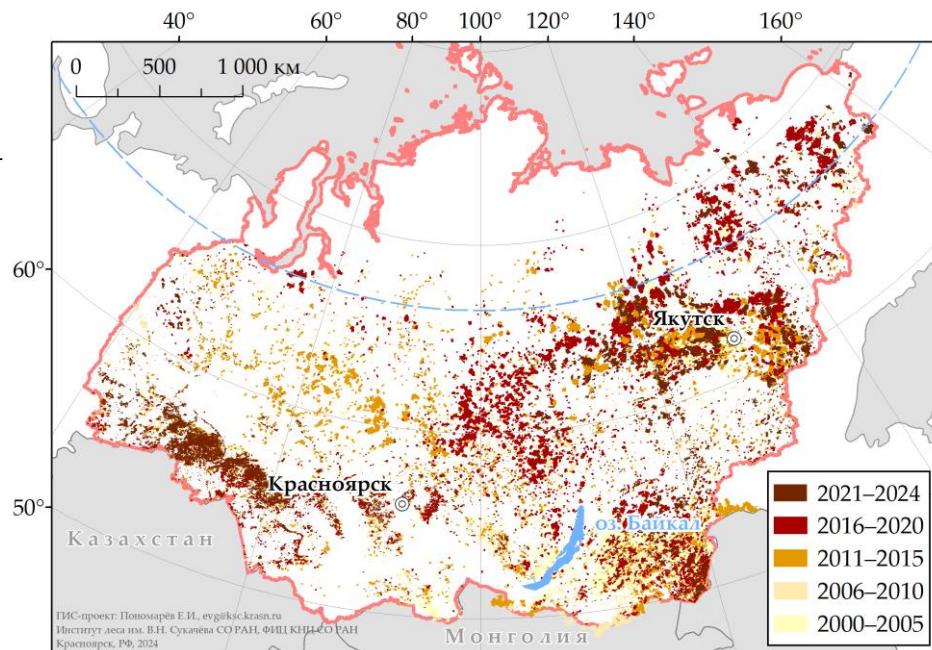


База данных пожаров Сибири  
по данным спутникового  
мониторинга 2000–2025 гг.  
Институт леса им. В.Н. Сукачева  
СО РАН, Красноярск.



Территория 970 млн га,  
Площадь лесов ~600 млн га

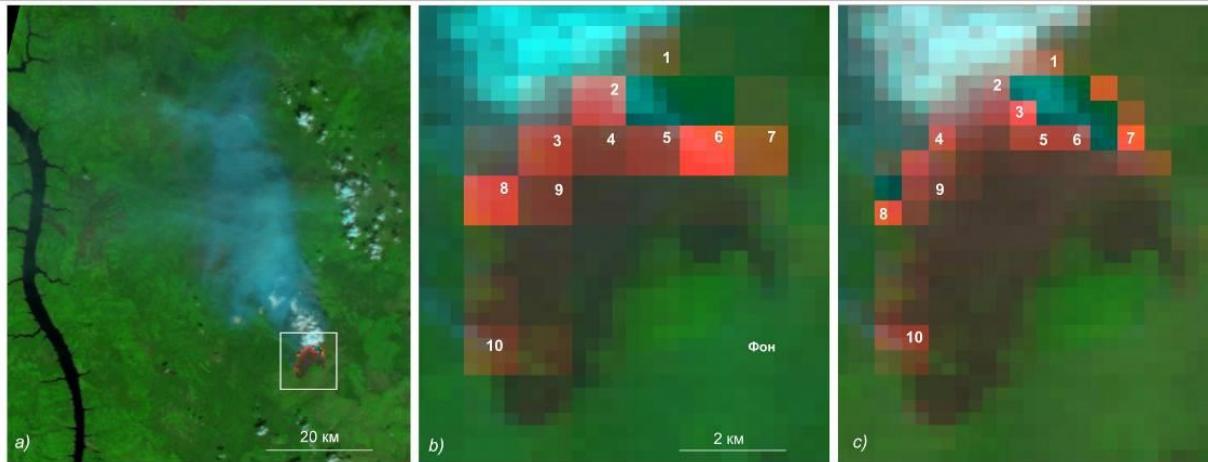
Карта растительности.  
Информационный ресурс «Вега»  
<http://pro-vega.ru/maps/>  
ИКИ РАН, Москва



# Спутниковые данные о пожарах растительности

I

Детектирование пожара по материалам Terra и Аqua/MODIS  
Аналог стандартного продукта MOD14



II

Обработка и архивация сведений  
об ЛП в базе данных

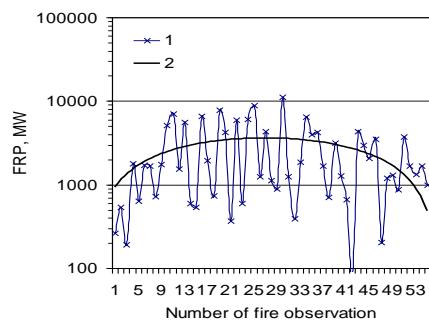
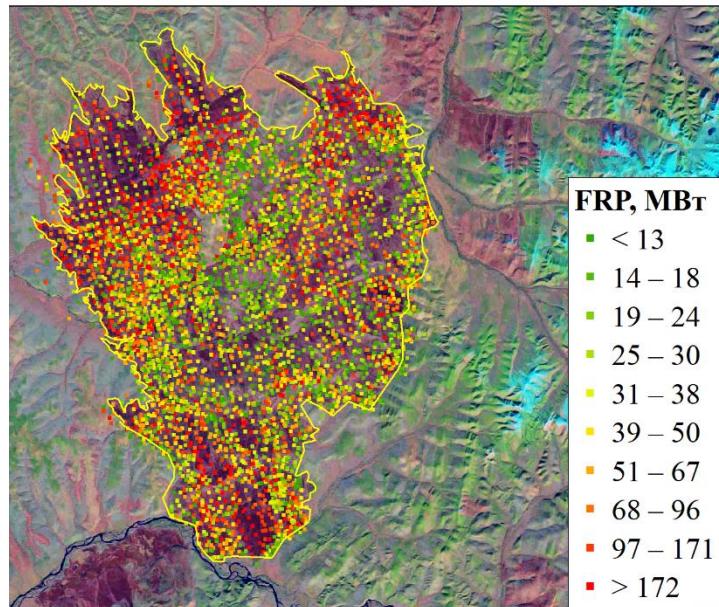
Срок наблюдений: **1996–2025** гг.;  
Объем данных: **>7×10<sup>6</sup>** записей;  
Формат представления: векторные ГИС-слои,  
атрибутивная информация



# Мощность теплоизлучения

## Fire Radiative Power (FRP)

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



Динамика FRP в границах пожара

$$FRP = \frac{S \times \sigma}{a} (L_4 - \bar{L}_4)$$

где  $L_4$  и  $\bar{L}_4$  – энергетические яркости ( $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}$ ) термически активного пикселя (цели) и фона в канале  $\lambda = 3.929\text{--}3.989 \text{ мкм}$ ;

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

постоянная Стефана–Больцмана;  
 $S$  – площади пикселя;

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

эмпирический коэффициент

# Исходные данные



# 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*)

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

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

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

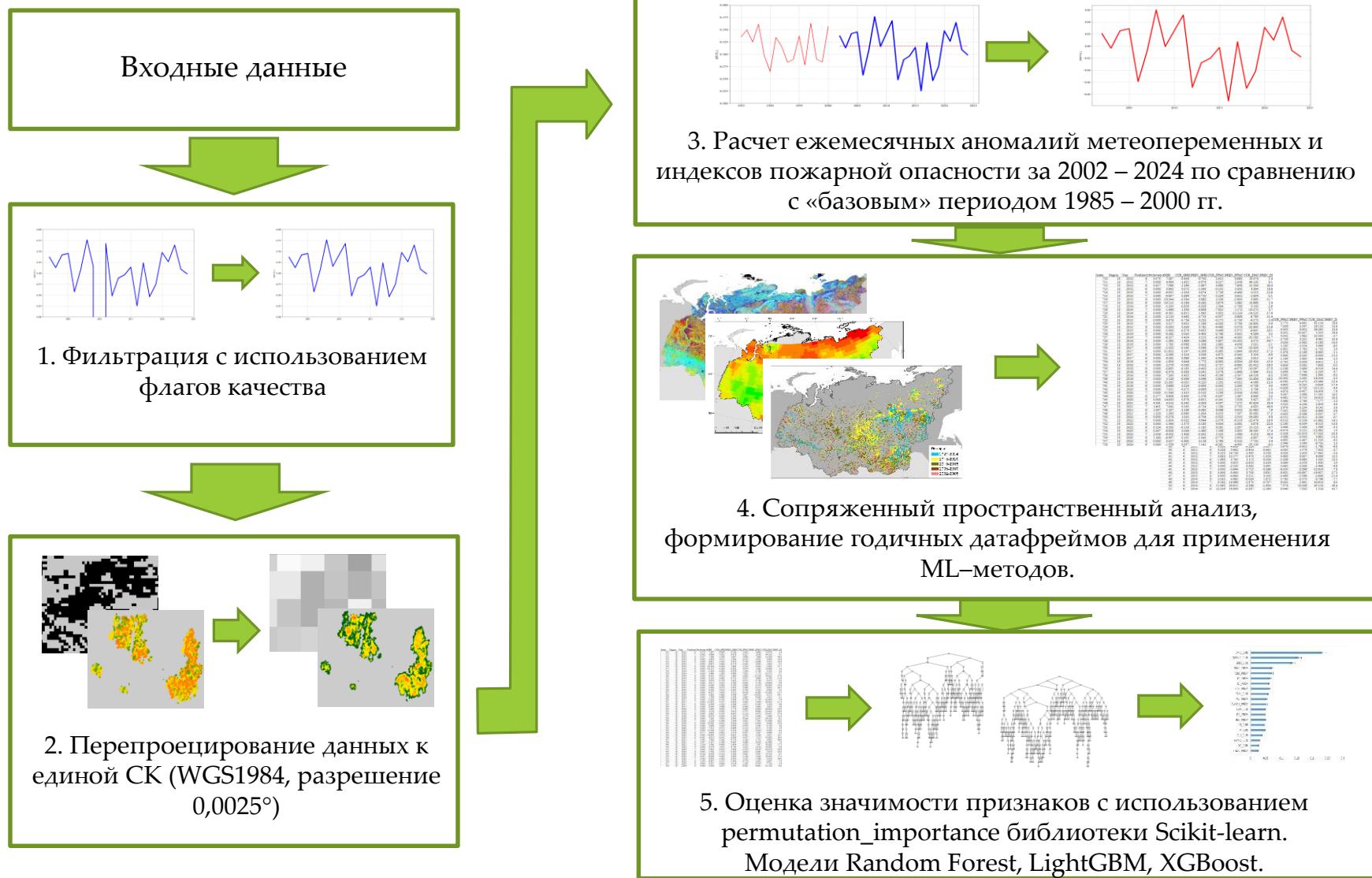
$NBR_{\text{prefire}}, NBR_{\text{postfire}}$  – данные до- и послепожарной съёмки

## 3. Теплообеспеченность в сезоне по ГТК (*Гидротермический коэффициент*)

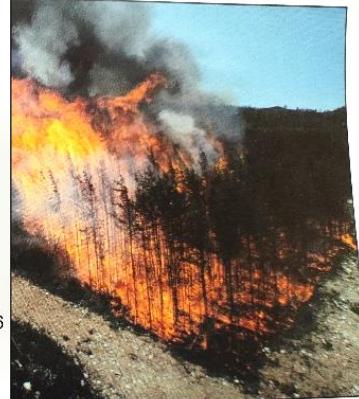
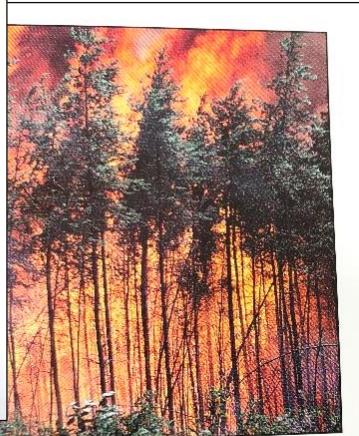
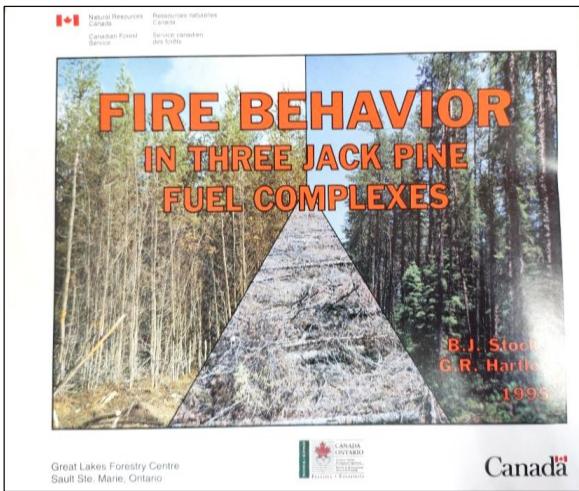
$$\Gamma TK = 10 \times \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{t_i}$$

$R_i$  – осадки, мм;  $t_i$  – температура воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $i$  – 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

July 9, 1976

#### FWI System Fire Behavior Indices

Initial Spread Index (ISI)	8.7
Buildup Index (BUI)	67
Fire Weather Index (FWI)	23

#### Fire Behavior Characteristics

Head fire rate of spread	16.2 m/min
Fuel Consumption	3.44 kg/m <sup>2</sup>
Frontal fire intensity	16718 kw/m

Type of Fire: Fully-developed crown fire

#### FWI System Fire Behavior Indices

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

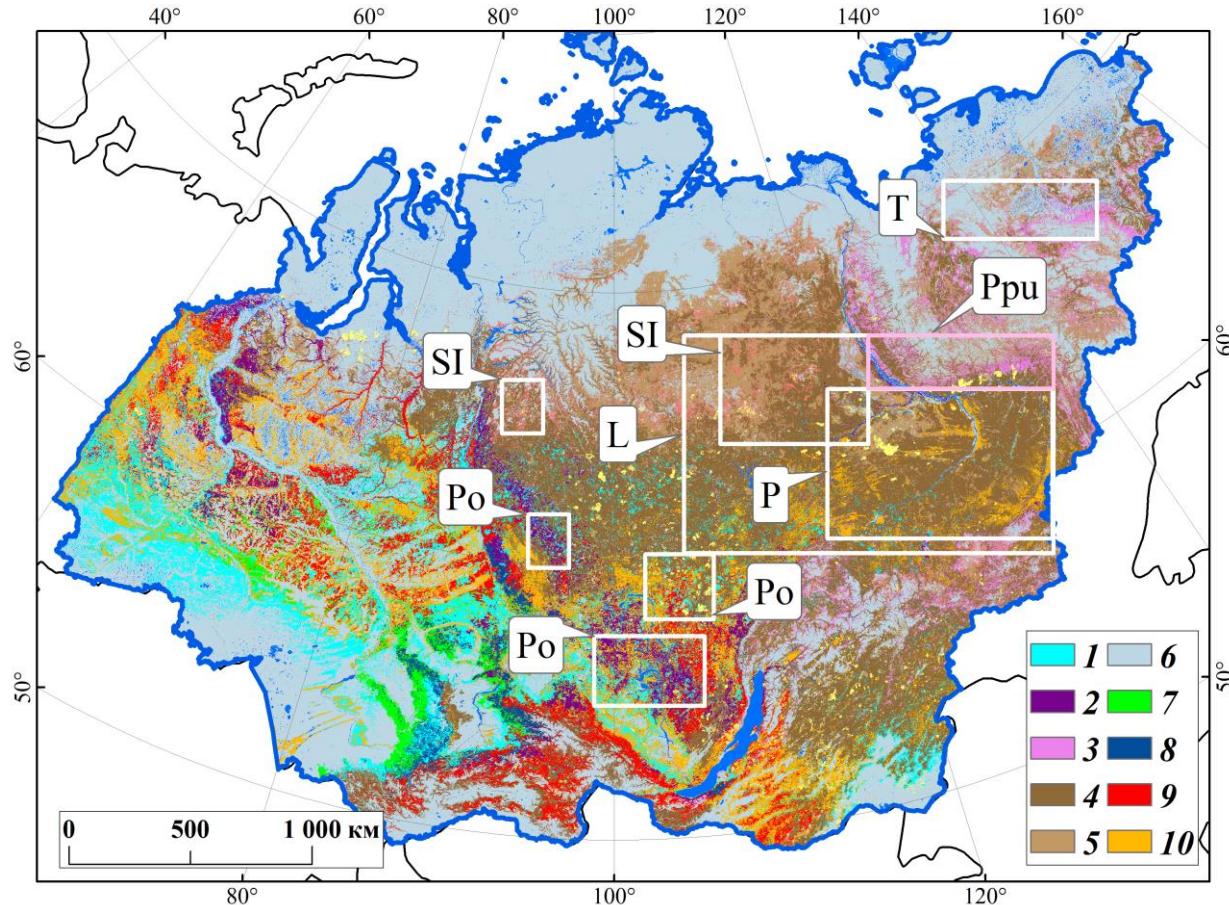
#### Fire Behavior Characteristics

Head fire rate of spread	1.6 m/min
Fuel Consumption	0.62 kg/m <sup>2</sup>
Frontal fire intensity	298 kw/m

Type of Fire: Low intensity surface fire

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

# География выборки данных о пожарах Сибири

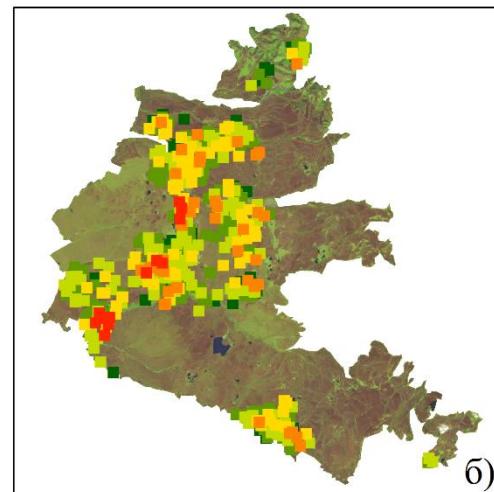
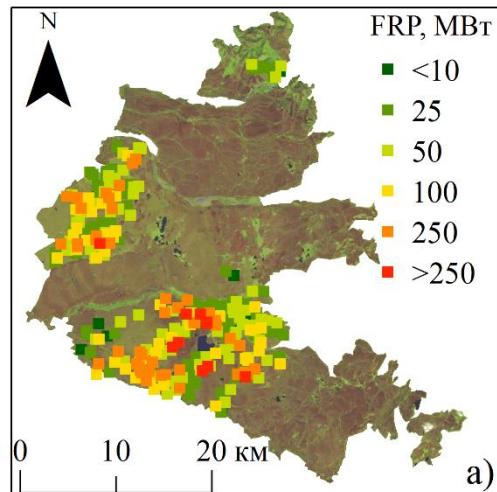


- 1 – Береза (*Betula spp.*), 2 – Ель (*Picea obovata*),
- 3 – Кедровый стланик (*Pinus pumila*),
- 4 – Лиственница (*Larix sibirica*),
- 5 – Лиственница редколесья (*Sparse larch*),
- 6 – Тундра (*Tundra vegetation*),
- 7 – Осина (*Populus tremula*),
- 8 – Пихта (*Abies sibirica*),
- 9 – Кедр (*Pinus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

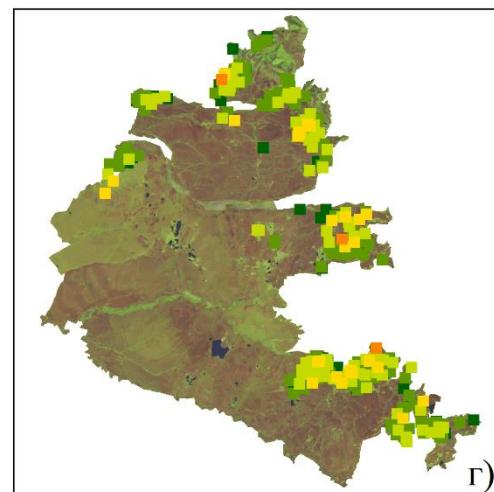
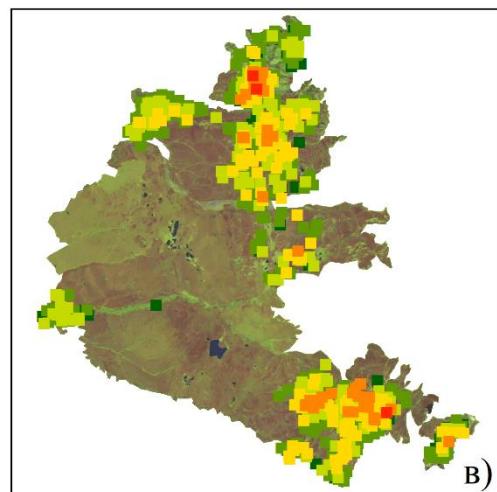
Выборка послепожарных полигонов:

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 <sub>пикс</sub> (МВт)	FRP <sub>инт</sub> ( $\times 10^3$ МВт)	$\sigma$ , ( $\times 10^3$ МВт)	Экстремум FRP <sub>инт'</sub> ( $\times 10^3$ 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

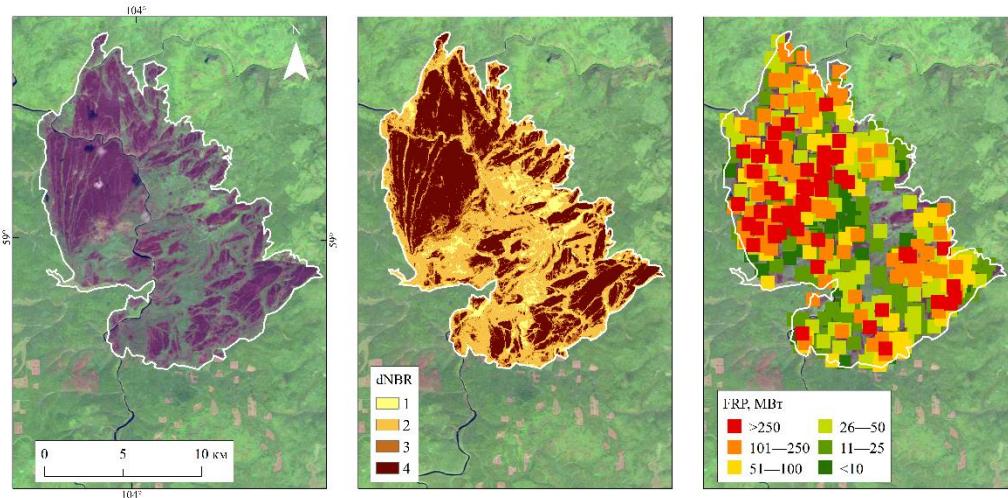
$$\Delta =$$

$$15 - 100 \%$$

$$500 - 1700 \%$$

$$400 - 1000 \%$$

# FRP vs степень пожарного воздействия

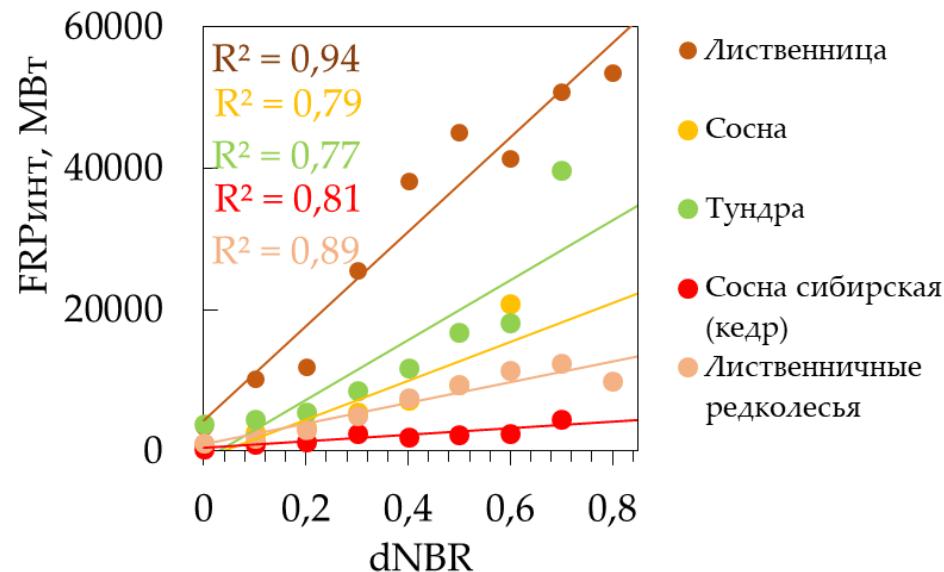


Линейная связь между индексами dNBR и FRP:

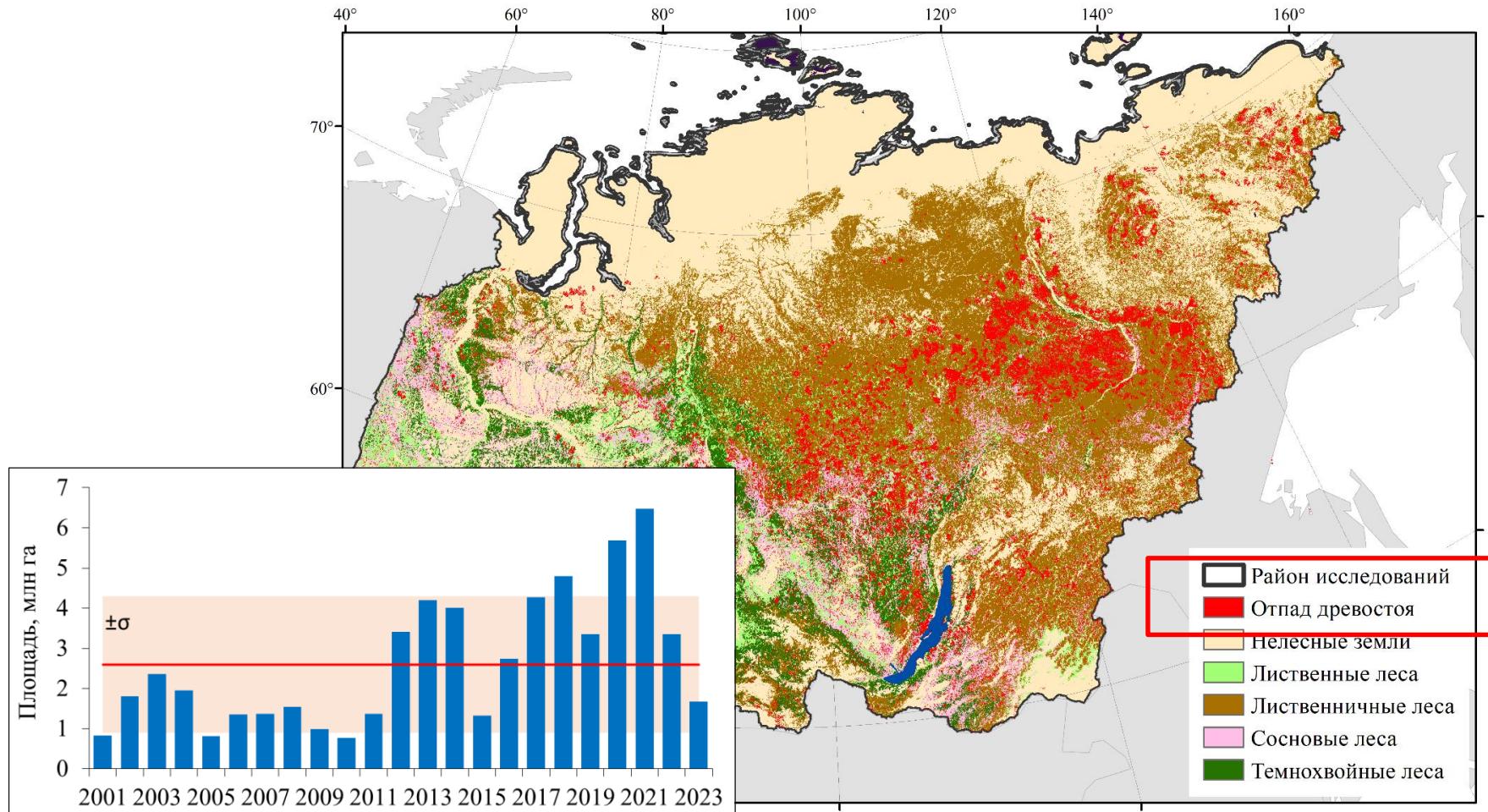
$R^2 = 0.75$  для всей выборки пожаров;

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

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



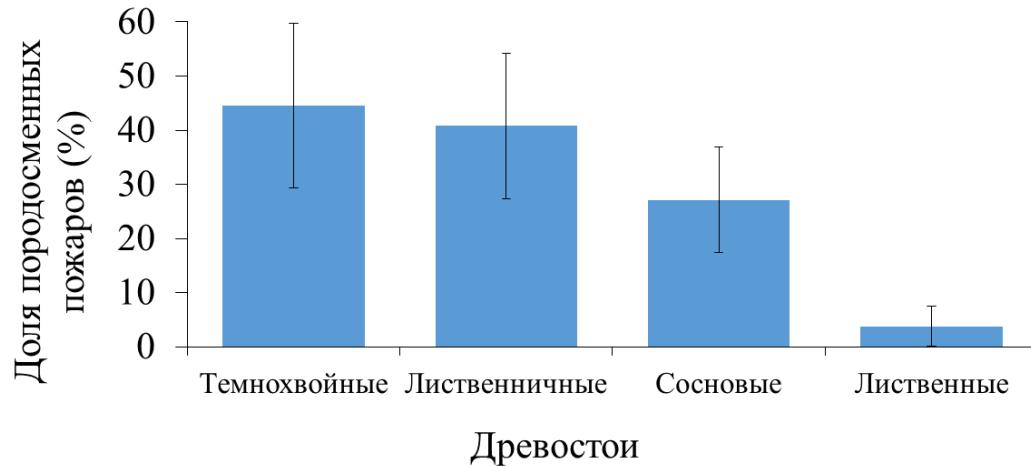
# Данные сервиса контроля потери древостоев



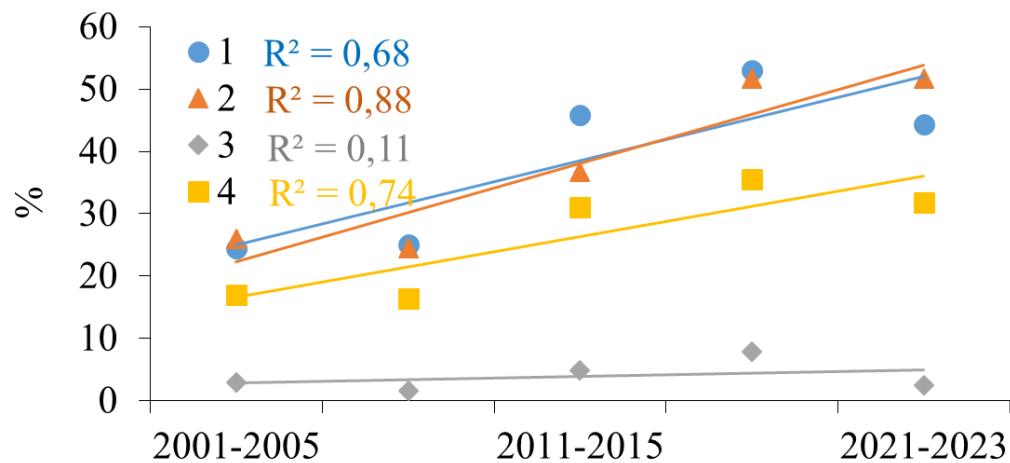
Global Forest Change (Hansen *et al.*, 2013)

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

# Породосменные пожары Сибири



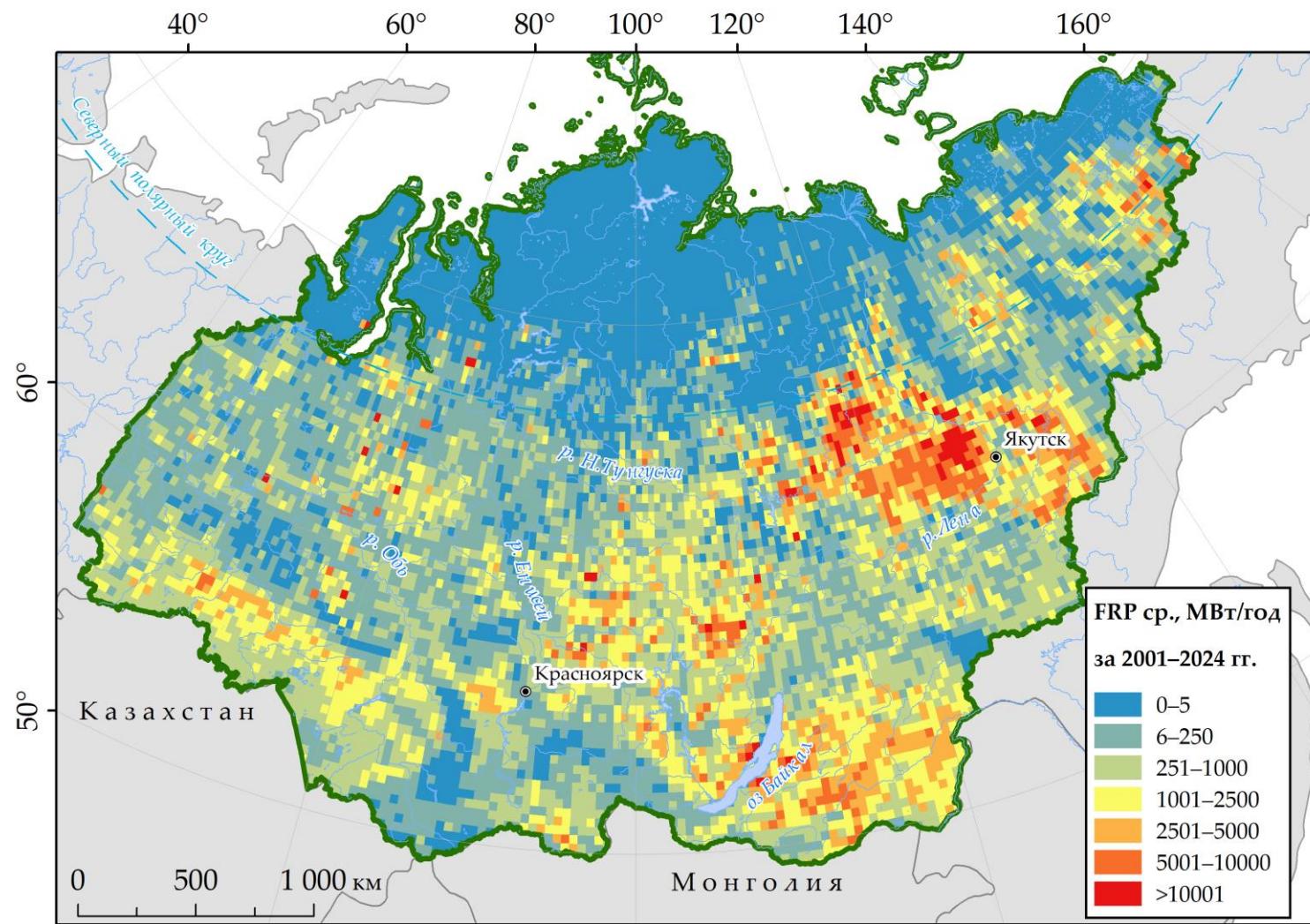
20–90% ежегодная доля породосменных пожаров в статистике **Global Forest Change**



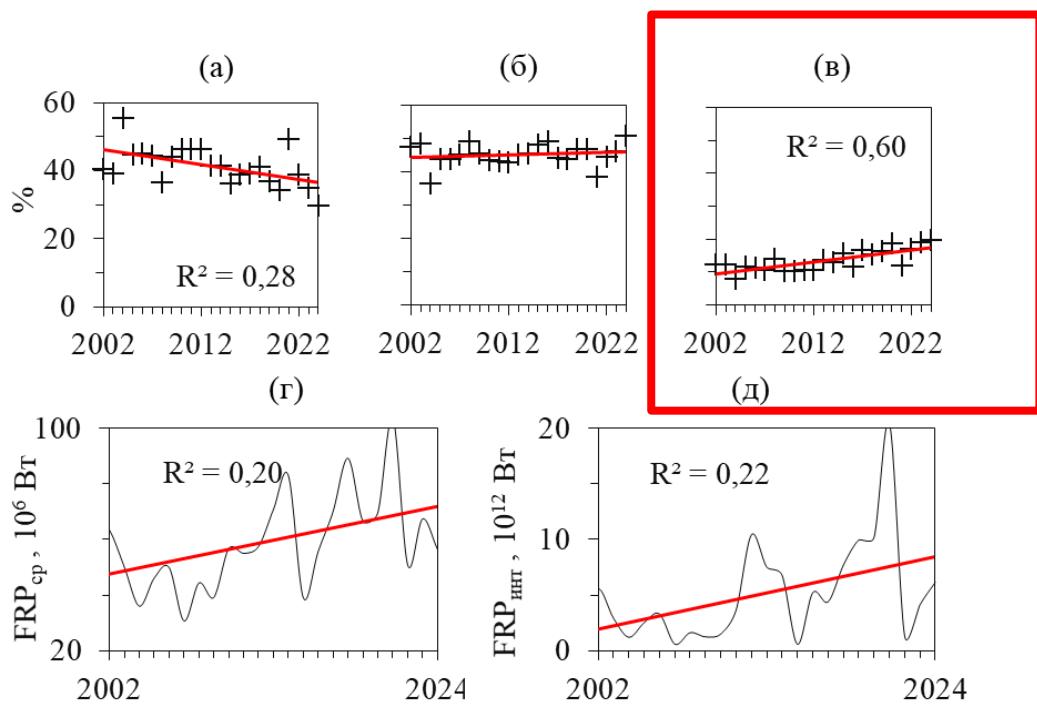
**Положительная динамика** доли площадей породосменных пожаров относительно общей статистики пожаров на интервале 2001 – 2023 гг.

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

# Интенсивность пожаров (2001-2024 гг.)



# Пожары высокой интенсивности

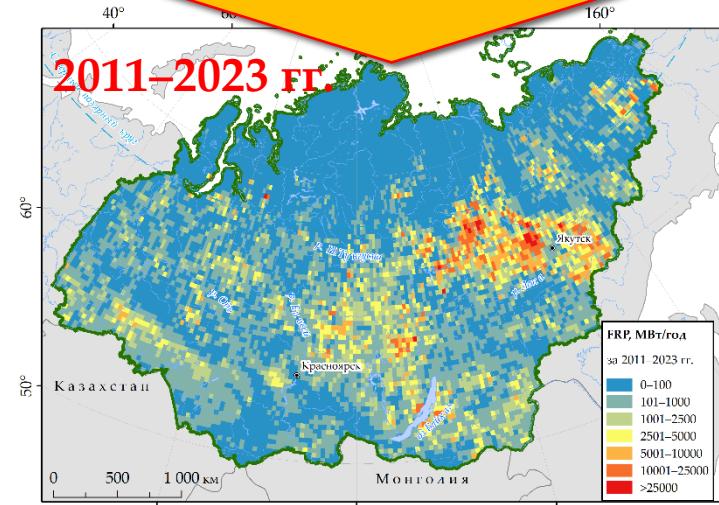
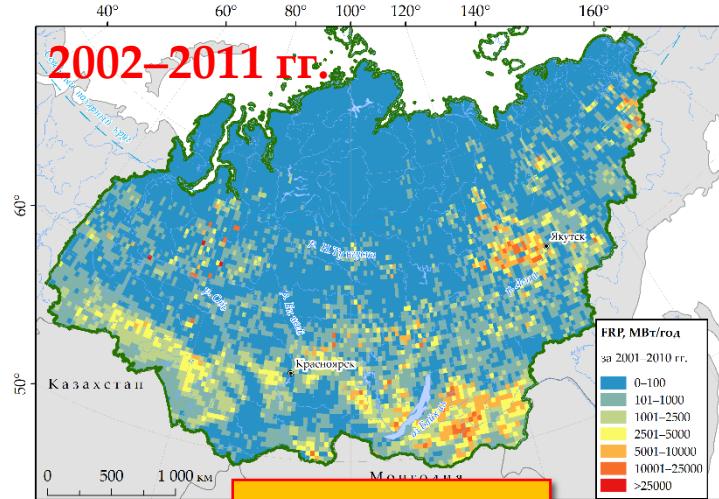


Площади пожаров высокой интенсивности (млн га/год):

**0.63**  $\pm$  0.31 – в 2002–2011 гг.;

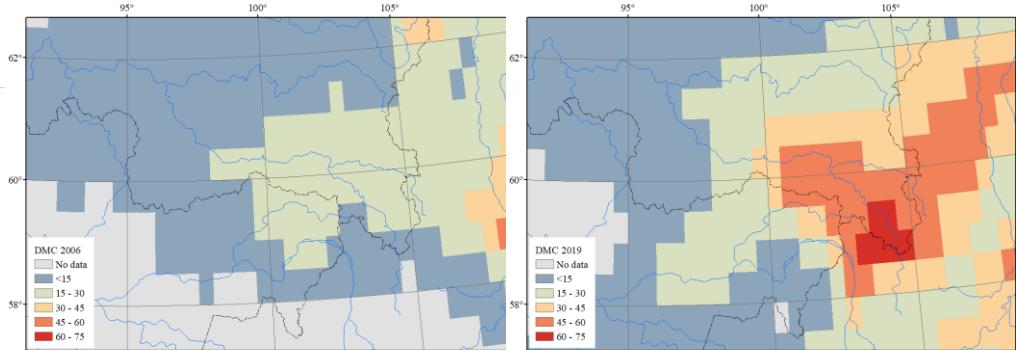
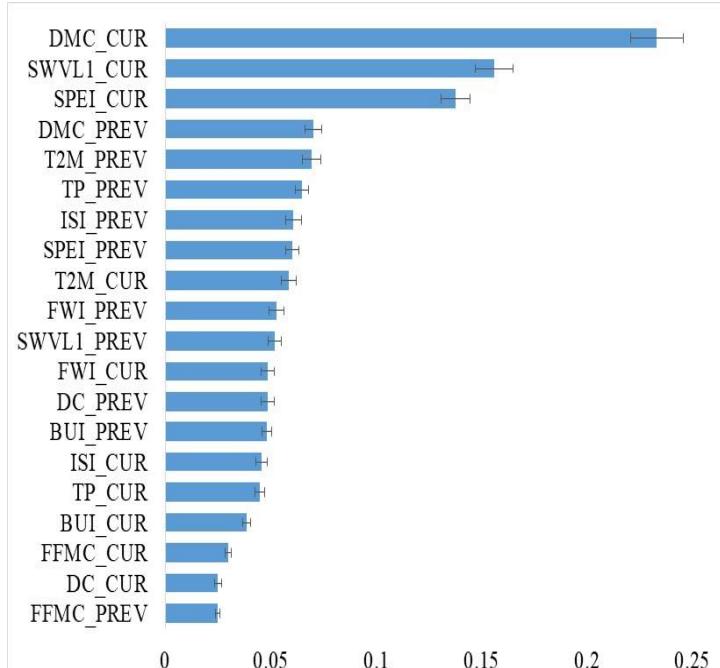
**1.70**  $\pm$  0.49 – в 2012–2019 гг.;

**2.50**  $\pm$  0.92 – в 2020–2023 гг.

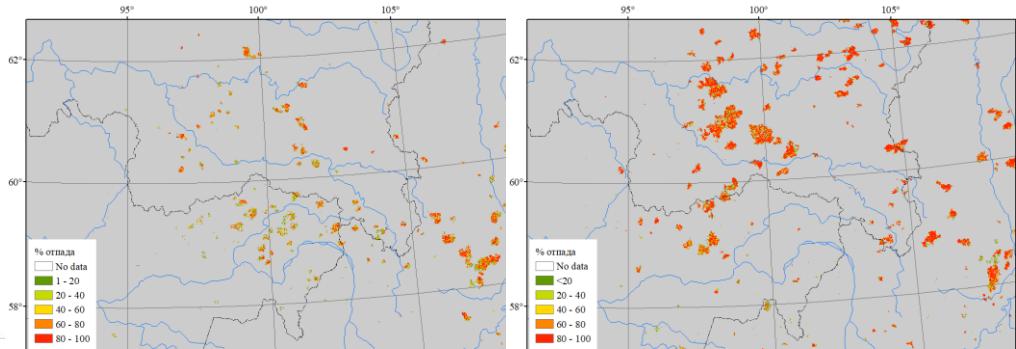


# Связь с климатическими факторами

Значимость факторов влияния  
на мощности теплоизлучения  
и послепожарные отпады древостоя



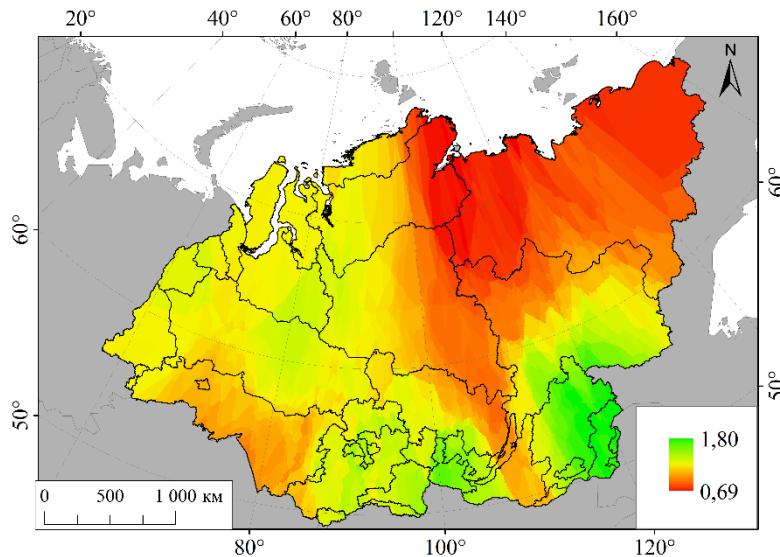
Варитивность индекса Duff Moisture Code (DMC)



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

Вариативность зон локализации  
породосменных пожаров

# Климатические факторы

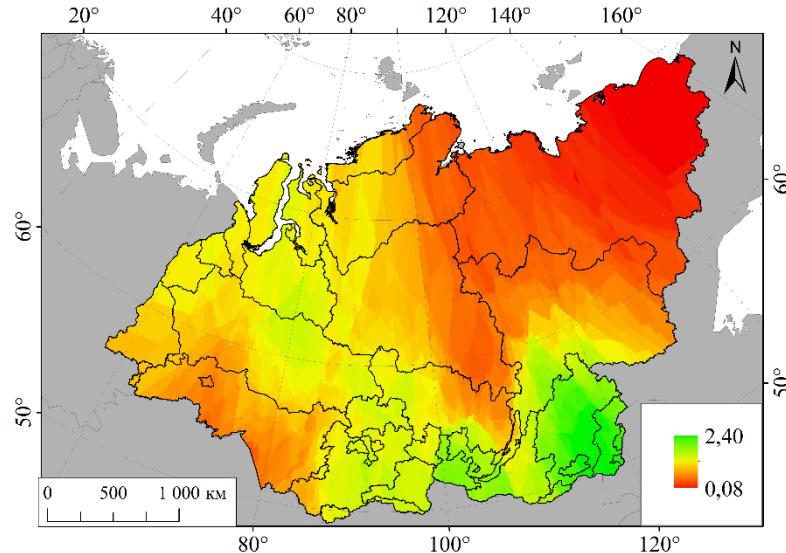


Связь FRP и гидротермического коэффициента ГТК:  
 $r = -0.5$  ( $p < 0.05$ )

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

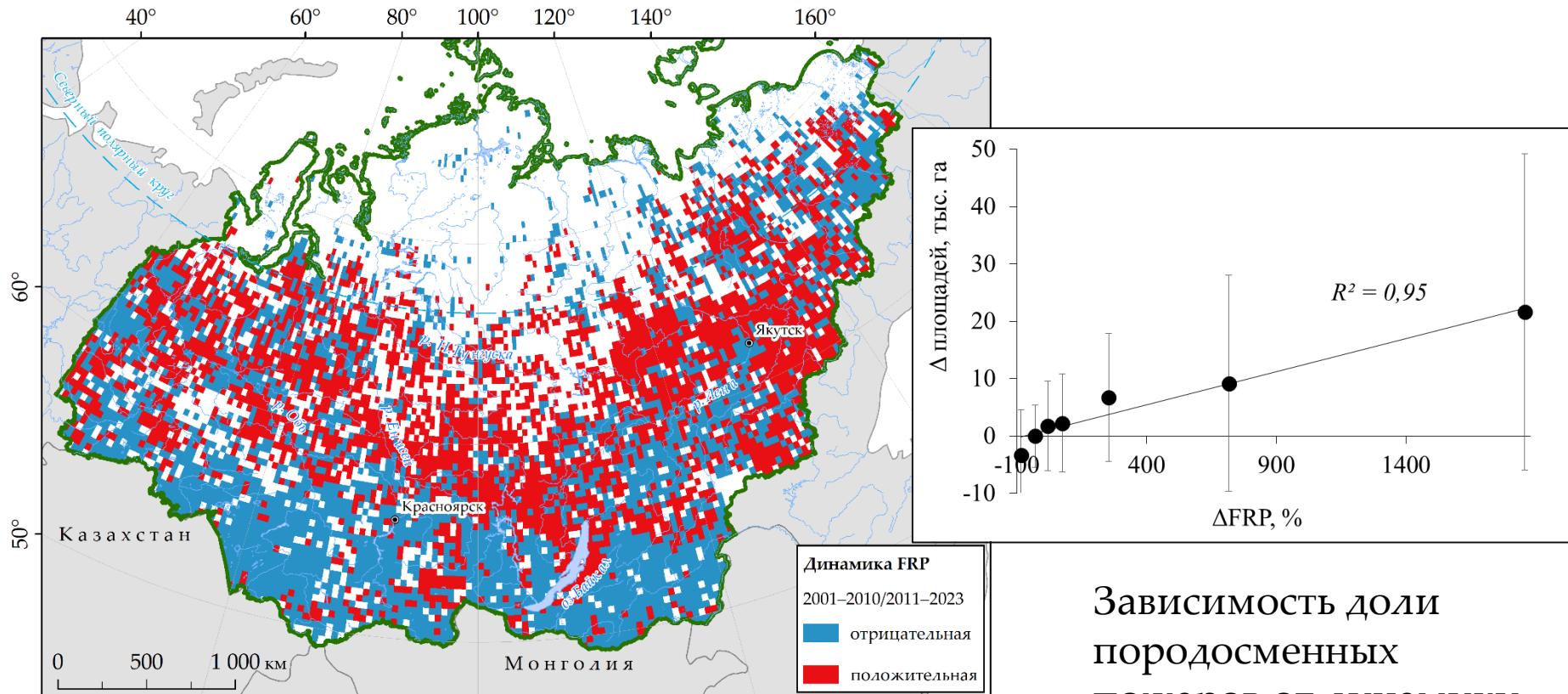
Экстраполяция на территорию Сибири **современного уровня тепло-влагообеспеченности по ГТК**

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



# Пространственная динамика интенсивности

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



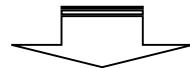
Положительная динамика на  $\sim 30\%$  территории Сибири;  $21\text{--}56\%$  – в арктической зоне

Зависимость доли породосменных пожаров от динамики FRP

# FRP в оценке пожарных эмиссий

Входные параметры по  
*Seiler, Crutzen, 1980*

Площадь пожаров ( $\text{м}^2$ )  
коэффициент полноты сгорания ( $\beta$ )  
запас ЛГМ ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ),  
углеродная фракция ( $\text{г}/\text{кг}$ )



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

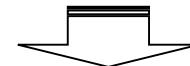
Коэффициент полноты сгорания ( $\beta$ ) и сгорающий запас растительных горючих материалов ( $B$ ) **рассматриваются, как константы для данных условий**

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  
*Ropomarev 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 <sup>6</sup> 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

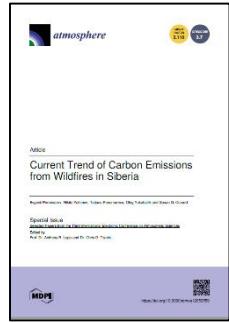
$$A \times x = B \quad A = \begin{pmatrix} 2.3 & 2.5 & 0.6 \\ 3.4 & 3.6 & 1.4 \\ 6.6 & 6.9 & 2.5 \end{pmatrix}, \quad x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 59.7 \\ 136.6 \\ 296.0 \end{pmatrix}$$

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**. Положительный 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

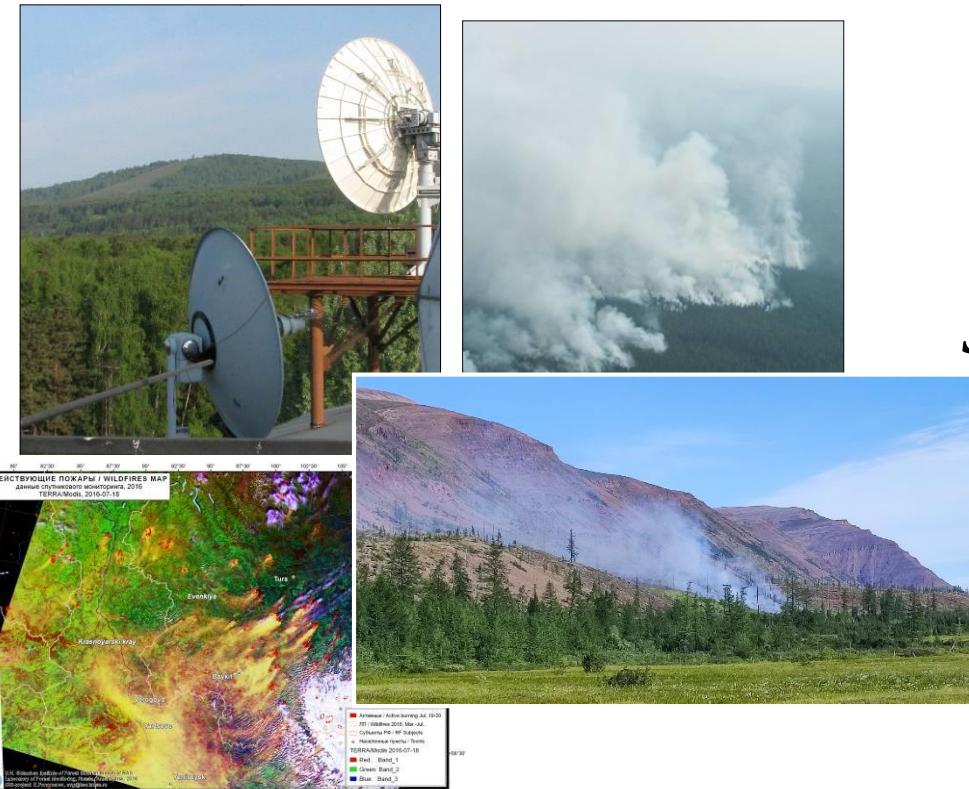
Пономарев Е.И. Способ расчета прямых пожарных эмиссий углерода с учетом пороговой классификации интенсивности пожара... // **Патент на изобретение**, 2021, RU 2755936 С1

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



ХХIII 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