

XXII Международная научная конференция
«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»

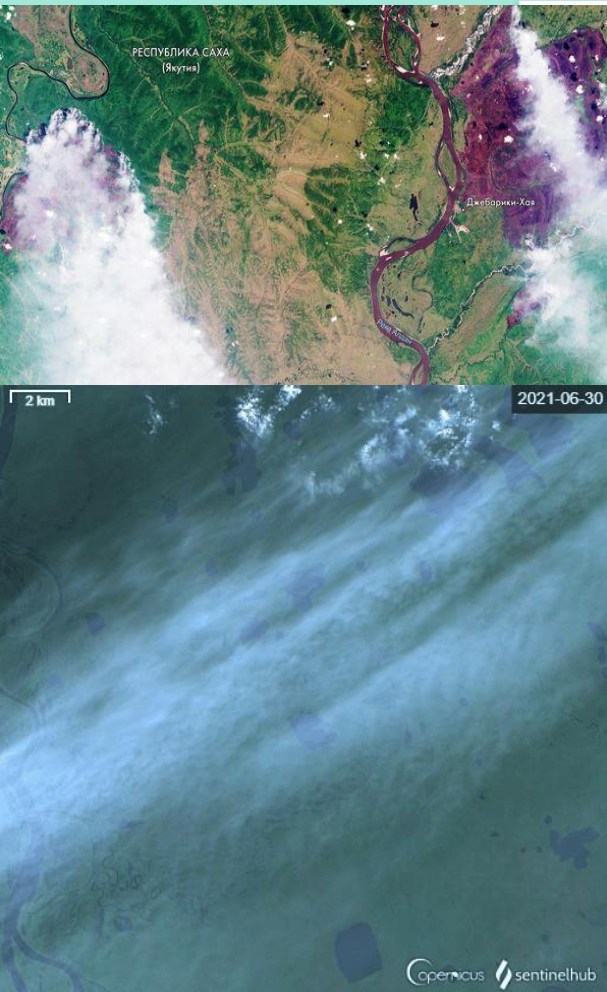
**Вариация мощности теплоизлучения от пожаров арктической
зоны Сибири при аномалиях коэффициента тепло- и
влагообеспеченности территории**

Анна Мальканова, м.н.с.

— Павел Третьяков, инженер-исследователь —

Евгений Пономарев, с.н.с.

Виктория Барабанова, инженер-исследователь



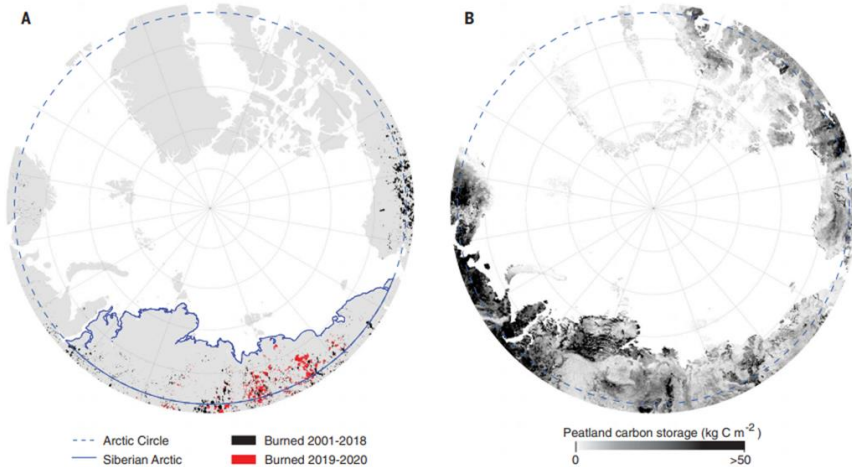
Введение

Тема горимости лесов и значимости послепожарных эффектов в Сибири не теряет актуальности на фоне прогнозируемых изменений климата. Одна из активно обсуждаемых в последние годы тем – смещение пожаров в северные широты, горимость северной части бореальных лесов и тундры Сибири, что особенно ярко проявилось в пожароопасные сезоны 2020–2024 гг.

В современных условиях использование спутниковых средств для мониторинга пожаров дает возможность ежедневно и многократно наблюдать большие территории, что повышает эффективность обнаружения пожаров и сбора атрибутивных сведений о параметрах горения.

Цель работы

анализ зависимости мощности теплоизлучения от пожара (FRP) от показателя ПВ – 1 и гидротермического коэффициента (ГТК) в арктической зоне Сибири.

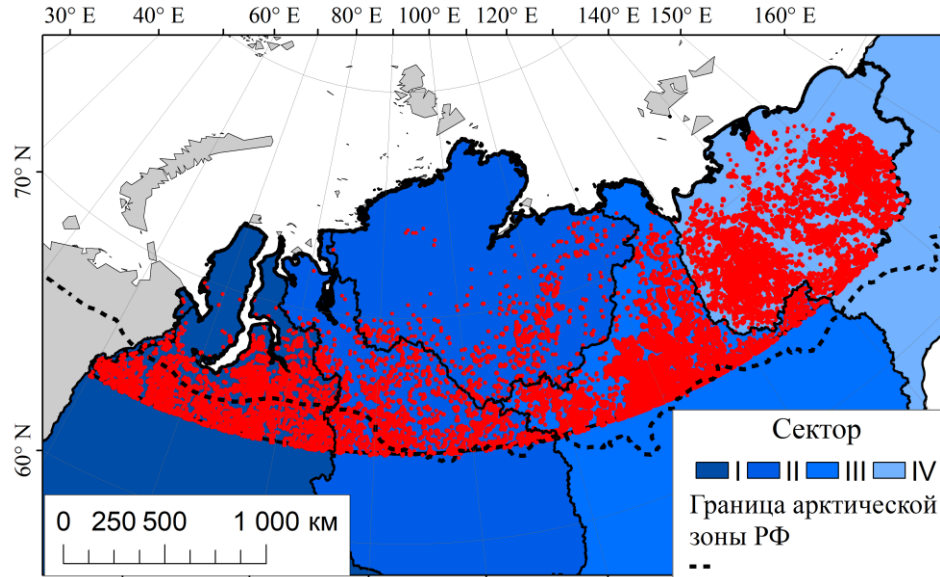


Descals A., 2022

Рассмотрены следующие аспекты:

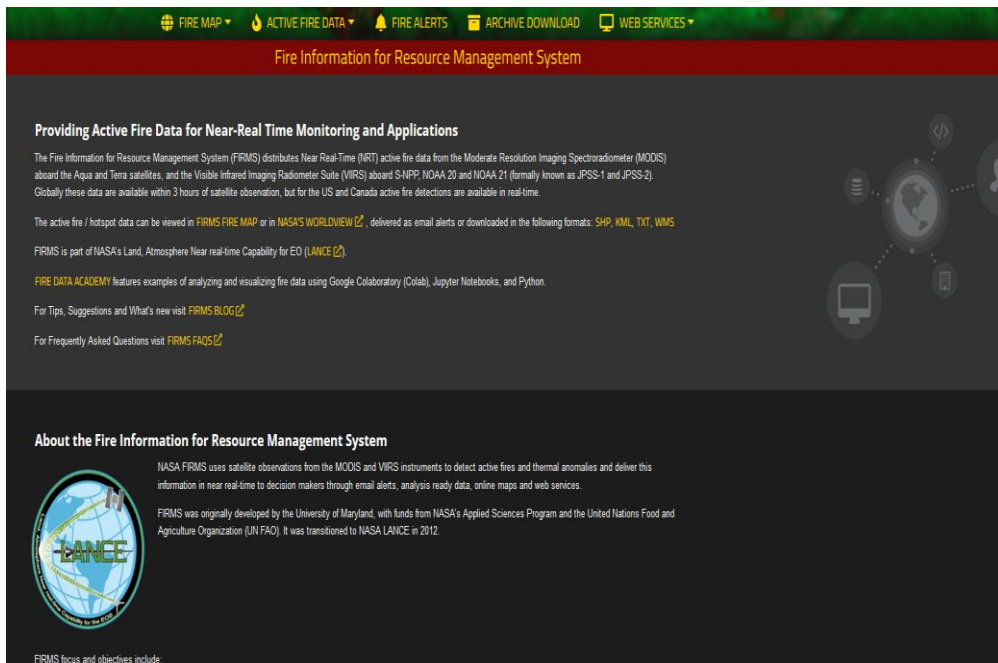
- Вариативность среднеголетних значений суммы мощности теплоизлучения от пожара (FRP) по материалам спутниковой съемки;
- Связь среднеголетних значений суммы FRP с динамикой показателя ПВ – 1 и коэффициента ГТК.

Район исследования



Район исследования:
арктическая зона Сибири
(64–74° с.ш. 60–165° в.д.)
На территории исследования
на градиенте долготы с
интервалом 20–30° были
рассмотрены четыре сектора,
выделенные по границам
бассейнов рек.

Исходные данные



Providing Active Fire Data for Near-Real Time Monitoring and Applications

The Fire Information for Resource Management System (FIRMS) distributes Near-Real-Time (NRT) active fire data from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) aboard the Aqua and Terra satellites, and the Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) aboard S-NPP, NOAA 20 and NOAA 21 (formally known as JPSS-1 and JPSS-2). Globally these data are available within 3 hours of satellite observation, but for the US and Canada active fire detections are available in real-time.

The active fire / hotspot data can be viewed in [FIRMS FIRE MAP](#) or in [NASA'S WORLDVIEW](#), delivered as email alerts or downloaded in the following formats: [SHP](#), [KML](#), [TXT](#), [WMS](#)

FIRMS is part of NASA's Land, Atmosphere Near-real-time Capability for EO ([LANCE](#))

[FIRE DATA ACADEMY](#) features examples of analyzing and visualizing fire data using Google Colaboratory (Colab), Jupyter Notebooks, and Python.

For Tips, Suggestions and What's new visit [FIRMS BLOG](#)

For Frequently Asked Questions visit [FIRMS FAQs](#)

About the Fire Information for Resource Management System

NASA FIRMS uses satellite observations from the MODIS and VIIRS instruments to detect active fires and thermal anomalies and deliver this information in near-real-time to decision makers through email alerts, analysis ready data, online maps and web services.

FIRMS was originally developed by the University of Maryland, with funds from NASA's Applied Sciences Program and the United Nations Food and Agriculture Organization (UN FAO). It was transitioned to NASA LANCE in 2012.

LANCE
Land, Atmosphere Near-real-time Capability for EO
Developed by the USGS

FIRMS focus and objectives include:

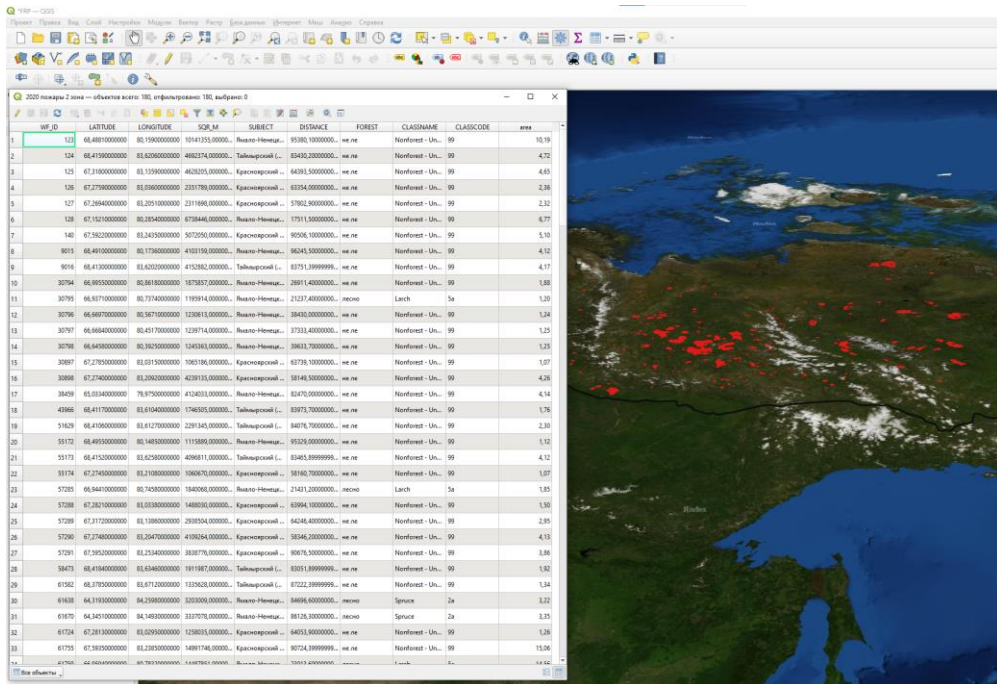
Данные о мощности теплоизлучения пожаров (FRP) за период с 2001 по 2023 гг.



Материалы спутниковых систем Terra и Aqua/MODIS. Стандартные продукты каталогов открытого доступа.*

* <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>

Исходные данные



The screenshot displays a GIS application window with a data table on the left and a satellite map on the right. The table lists various forest plots with their geographic coordinates and other attributes. The map shows a forested area with several red circular markers indicating specific locations.

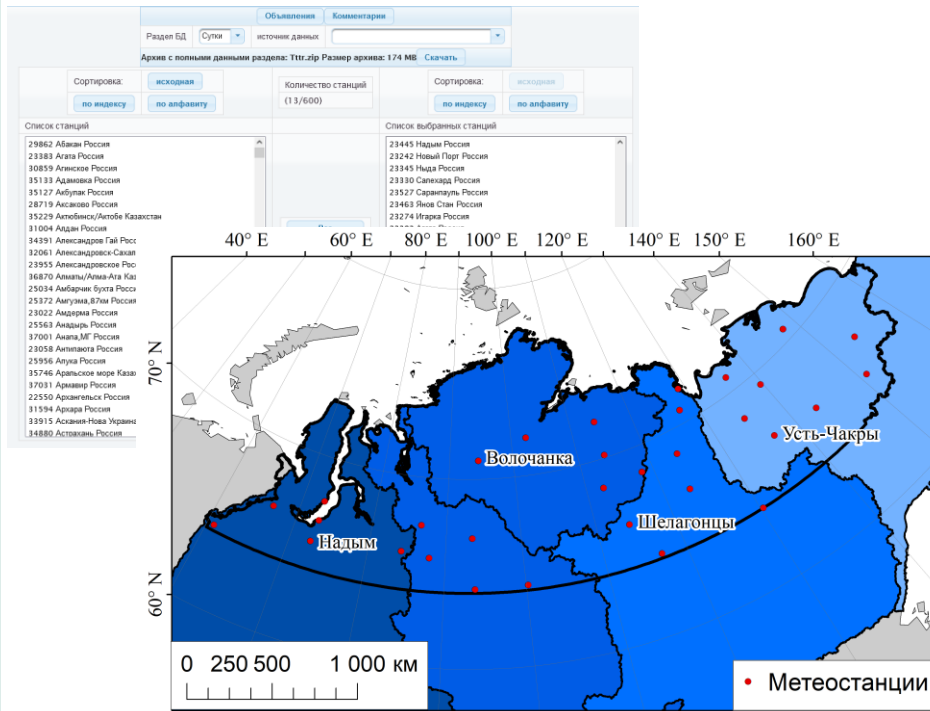
WF_ID	LATITUDE	LONGITUDE	SQR_M	SUBJECT	DISTANCE	FOREST	CLASSNAME	CLASSCODE	area
121	61.4812000000	82.1900000000	1914125.000000	Букело-Ненецк.	9706.30000000	не на	Nonforest-Uh...	99	16.99
124	61.4793000000	82.6200000000	4882274.000000	Табангоцкая Л.	82402.20000000	не на	Nonforest-Uh...	99	4.21
125	61.3180000000	81.1590000000	4032025.000000	Красноярский	64391.50000000	не на	Nonforest-Uh...	99	4.63
126	62.2720000000	82.8600000000	2391799.000000	Красноярский	83754.00000000	не на	Nonforest-Uh...	99	2.36
127	62.2844000000	82.2015000000	2311686.000000	Красноярский	57962.80000000	не на	Nonforest-Uh...	99	2.32
128	62.1821000000	82.2854000000	673846.000000	Букело-Ненецк.	17911.50000000	не на	Nonforest-Uh...	99	6.37
140	62.2844000000	82.2425000000	5072560.000000	Красноярский	90296.10000000	не на	Nonforest-Uh...	99	5.10
8015	61.4812000000	82.1798000000	4182199.000000	Букело-Ненецк.	96249.30000000	не на	Nonforest-Uh...	99	4.12
8016	61.4812000000	81.6200000000	4182382.000000	Табангоцкая Л.	63791.30000000	не на	Nonforest-Uh...	99	4.17
20794	61.6951000000	82.8618000000	3873877.000000	Букело-Ненецк.	26911.40000000	не на	Nonforest-Uh...	99	1.88
20795	61.6917000000	82.7174000000	1939194.000000	Букело-Ненецк.	21237.40000000	лесоз.	Larch	2a	1.20
20796	61.6951000000	82.8679000000	3226813.000000	Букело-Ненецк.	38420.30000000	не на	Nonforest-Uh...	99	1.24
20797	61.6948400000	82.4517000000	1238714.000000	Букело-Ненецк.	37331.40000000	не на	Nonforest-Uh...	99	1.23
20798	61.6948400000	82.3629000000	1246380.000000	Букело-Ненецк.	38613.70000000	не на	Nonforest-Uh...	99	1.29
20807	62.2720000000	82.2175000000	1981196.000000	Красноярский	63779.10000000	не на	Nonforest-Uh...	99	1.07
20808	62.2728000000	82.2802000000	4239135.000000	Красноярский	38148.30000000	не на	Nonforest-Uh...	99	4.26
24679	61.0334000000	78.9700000000	4124833.000000	Букело-Ненецк.	64749.10000000	не на	Nonforest-Uh...	99	4.14
42986	61.4717000000	82.0154000000	1748305.000000	Табангоцкая Л.	13973.70000000	не на	Nonforest-Uh...	99	1.78
51629	61.4186000000	82.0127000000	2391145.000000	Табангоцкая Л.	84679.70000000	не на	Nonforest-Uh...	99	2.30
59172	61.4812000000	82.1482000000	1111890.000000	Букело-Ненецк.	95239.00000000	не на	Nonforest-Uh...	99	1.52
59173	61.4712000000	82.6250000000	4998811.000000	Табангоцкая Л.	62483.30000000	не на	Nonforest-Uh...	99	4.12
59174	62.2748000000	82.1888000000	1968763.000000	Красноярский	38160.70000000	не на	Nonforest-Uh...	99	1.07
57201	61.6641000000	82.7430000000	1840546.000000	Букело-Ненецк.	21421.20000000	лесоз.	Larch	2a	1.83
57208	62.2821000000	82.0188000000	1488030.000000	Красноярский	63994.30000000	не на	Nonforest-Uh...	99	1.90
57209	62.3177000000	82.1388000000	2935264.000000	Красноярский	64248.40000000	не на	Nonforest-Uh...	99	2.93
57300	62.2748000000	82.2547000000	4192654.000000	Красноярский	38346.20000000	не на	Nonforest-Uh...	99	4.13
57301	62.3962000000	82.2524000000	3838776.000000	Красноярский	66676.30000000	не на	Nonforest-Uh...	99	3.89
58473	61.4794000000	82.6340000000	1991197.000000	Табангоцкая Л.	63951.30000000	не на	Nonforest-Uh...	99	1.62
61262	61.3702000000	81.6712000000	1224526.000000	Табангоцкая Л.	67222.30000000	не на	Nonforest-Uh...	99	1.34
61638	61.1930000000	84.2980000000	3203000.000000	Букело-Ненецк.	36896.60000000	лесоз.	Spruce	2a	3.21
61670	61.5401000000	84.1483000000	3337076.000000	Букело-Ненецк.	86176.30000000	не на	Nonforest-Uh...	99	1.33
61724	62.2813000000	82.0209000000	1238823.000000	Красноярский	64653.80000000	не на	Nonforest-Uh...	99	1.26
61773	62.3962000000	82.2392000000	14891748.000000	Красноярский	60774.30000000	не на	Nonforest-Uh...	99	31.04
61784	62.6260000000	80.7830000000	43897663.000000	Букело-Ненецк.	10003.40000000	лесоз.	Larch	2a	14.42

Сведения о площадях пожаров за период с 1996 по 2023 гг.



Архив Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН спутникового мониторинга

Исходные данные

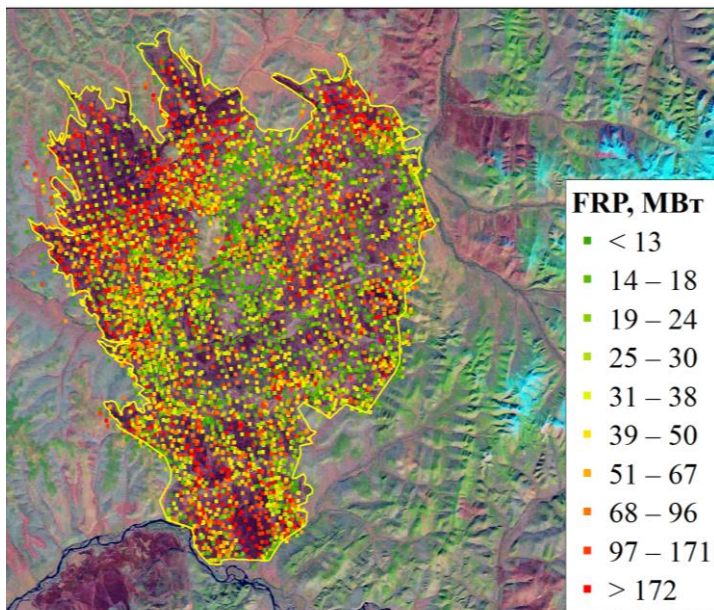


Данные о количестве осадков и температуре с 21 метеостанции за период с 2001 г. по 2023 г.

Открытый каталог
«Специализированные массивы
для климатических
исследований»*

* <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=1>

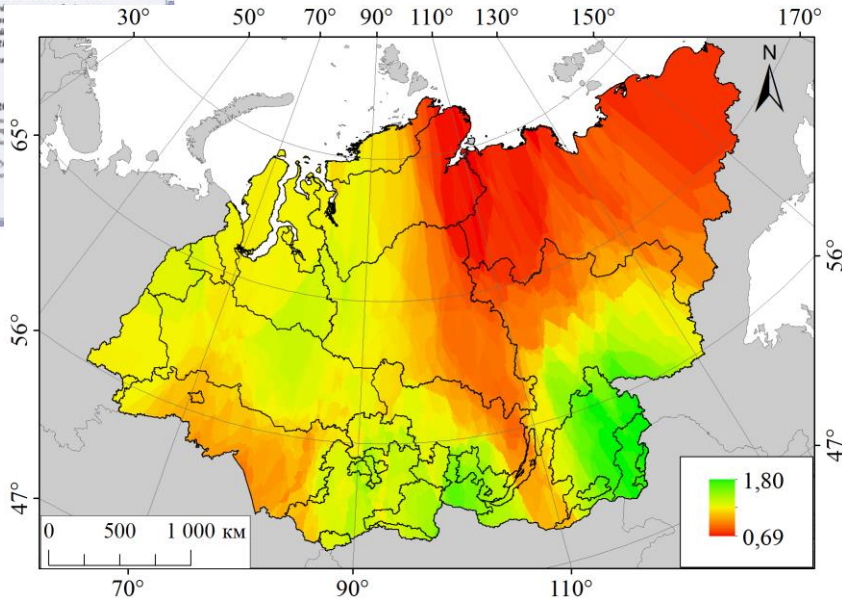
Fire Radiative Power, FRP



$$FRP = \frac{A_{pix} \cdot \sigma}{a} (L_4 - \bar{L}_4)$$

где A_{pix} — площадь пикселя MODIS;
 $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ — постоянная Стефана – Больцмана;
 L_4 — энергетическая яркость термически активного пикселя (цели) в канале 21 радиометра MODIS $\lambda \approx 4 \text{ мкм}$;
 \bar{L}_4 — энергетическая яркость фона в том же спектральном диапазоне;
 $a = 3,0 \cdot 10^{-9} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{К}^{-4}$ — эмпирическая постоянная.

Коэффициент ГТК



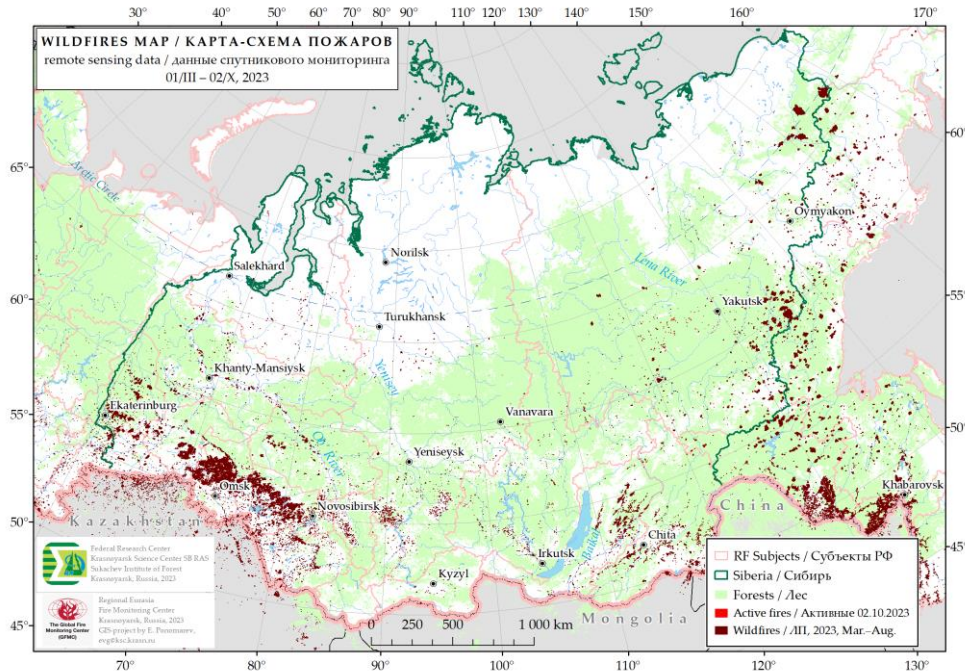
$$\text{ГТК} = 10 \times \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{t_i}$$

где R_i – осадки в миллиметрах при $t > +10^\circ\text{C}$ для i -го дня сезона, мм;
 t_i – значение температуры в этот же период, $^\circ\text{C}$;
10 – нормировочный коэффициент.

Горимость

$$\gamma = \left(S_{\text{ЛП}} / S_{\text{лес}} \right) \times 100\%,$$

где γ – относительная горимость (%),
 $S_{\text{ЛП}}$ – суммарная за каждый сезон площадь лесных пожаров,
 $S_{\text{лес}}$ – площадь, покрытая растительностью, включая тундры для каждого сектора.



Коэффициент ПВ –1



$$\text{ПВ}_n = [\text{ПВ}_{n-1} + t_{n-1}(t_{n-1} - \tau_{n-1})] \cdot K_n - \text{при } t_{n-1} > 0,$$

$$\text{ПВ}_n = [\text{ПВ}_{n-1} + (t_{n-1} - \tau_{n-1})] \cdot K_n - \text{при } t_{n-1} \leq 0,$$

где ПВ_n – показатель влажности на утро текущего дня;

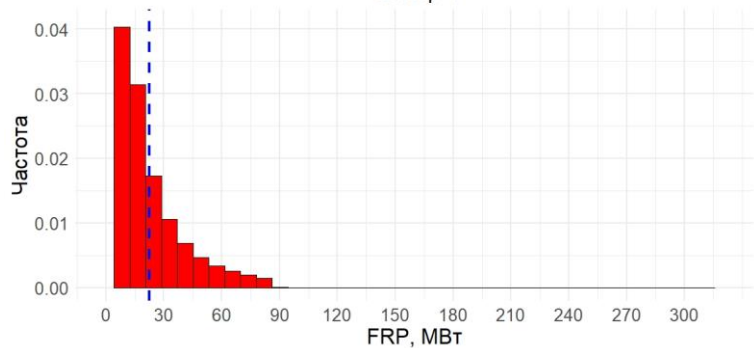
ПВ_{n-1} – показатель влажности на утро предшествующего дня;

t_{n-1} и τ_{n-1} – температура воздуха и точки росы в предшествующий день на 13 ч. декретного времени, °C;

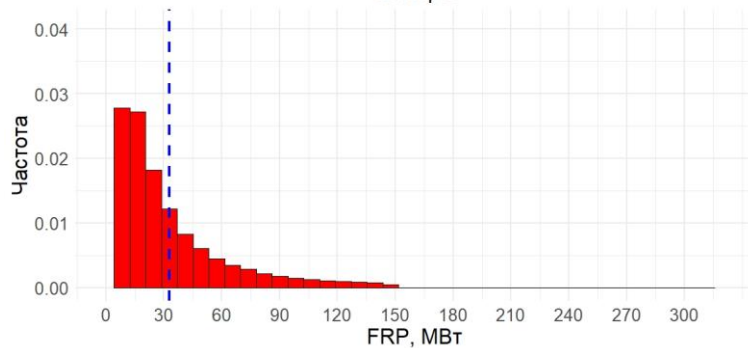
K_n – коэффициент учета осадков, который в дни с осадками до 0,5 мм равен 1.

Результаты. Частота встречаемости пикселей FRP с различными значениями

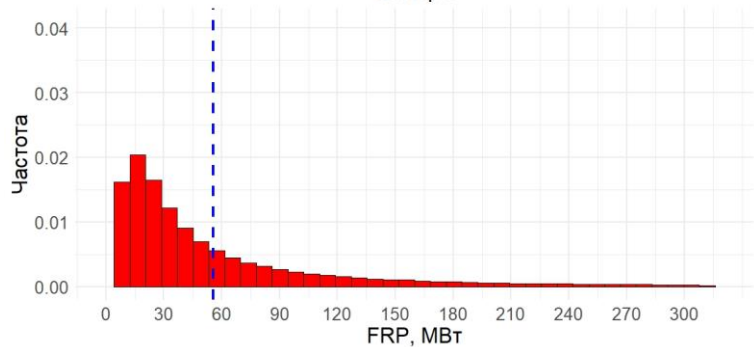
Сектор 1



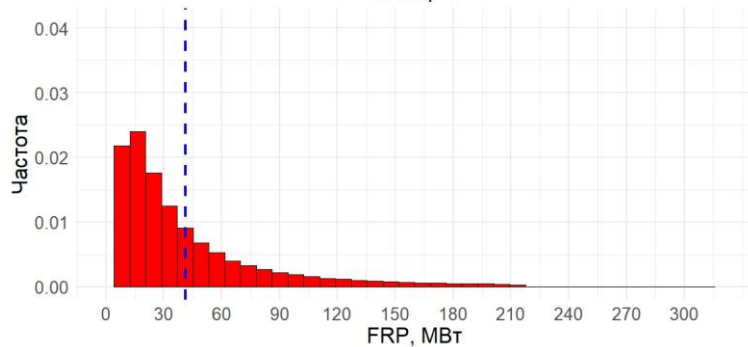
Сектор 2



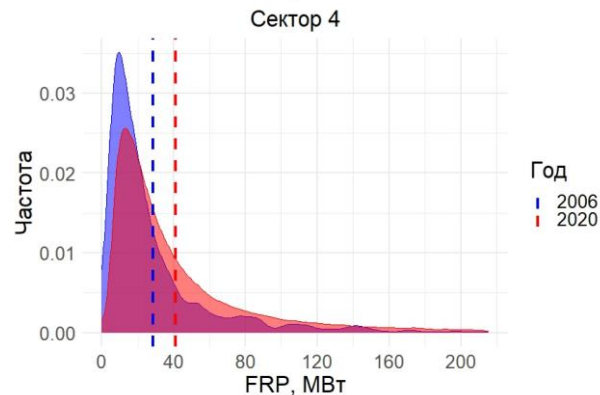
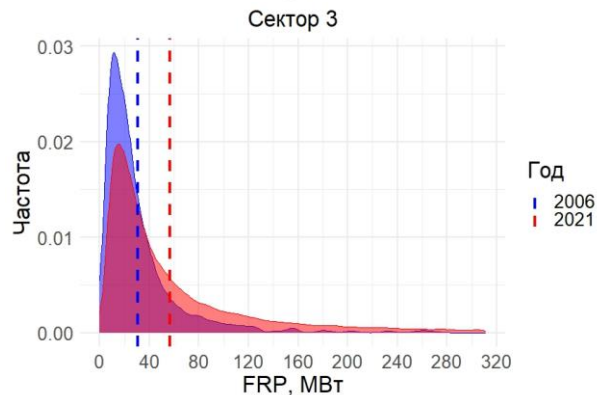
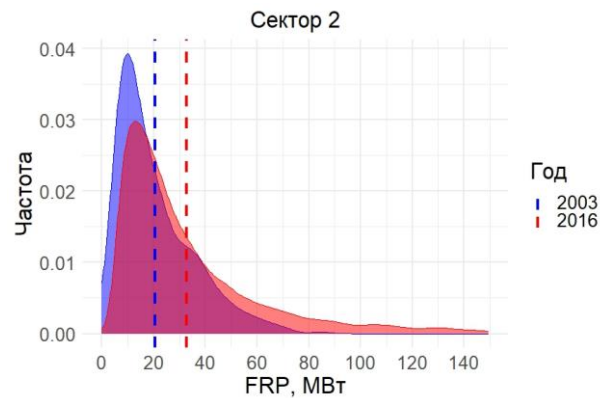
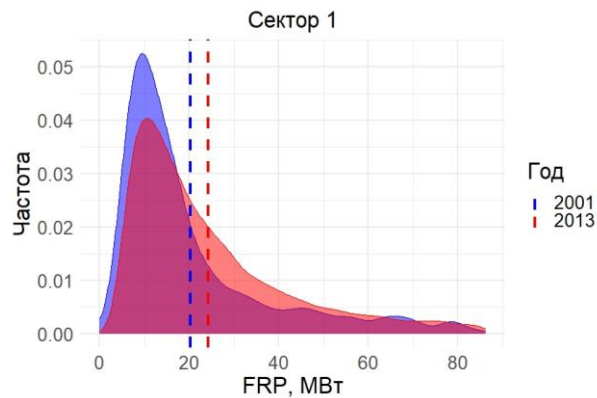
Сектор 3



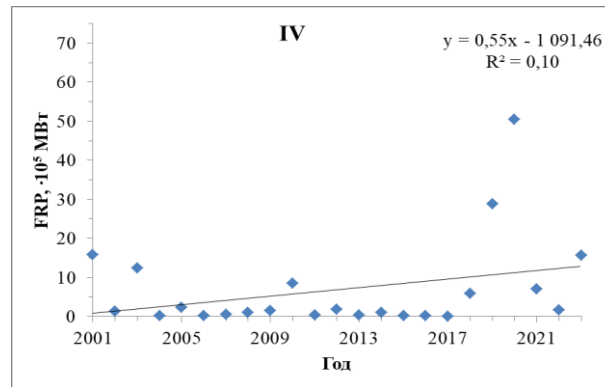
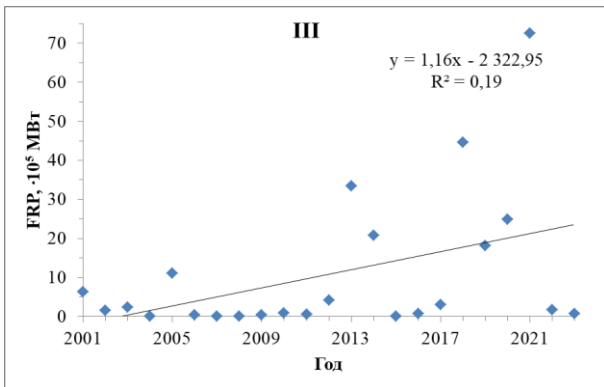
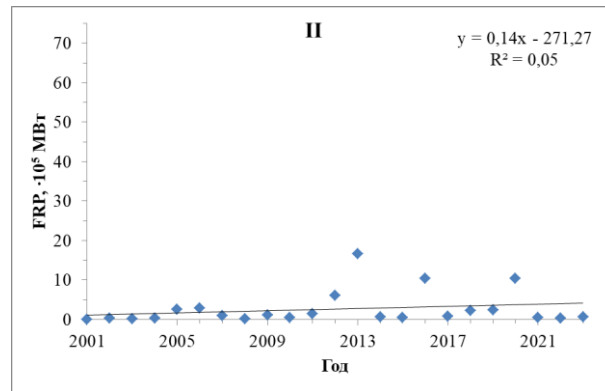
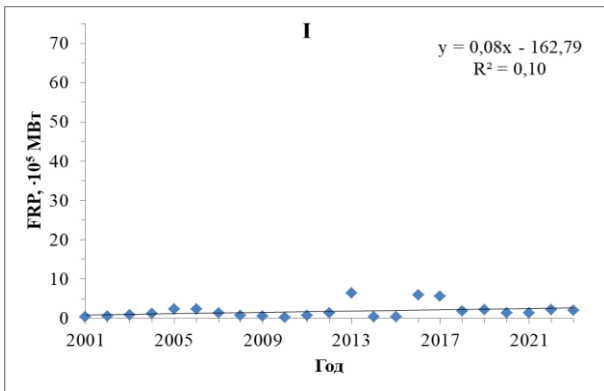
Сектор 4



Результаты. Распределение значений пикселей FRP в зависимости от пожарных условий сезона



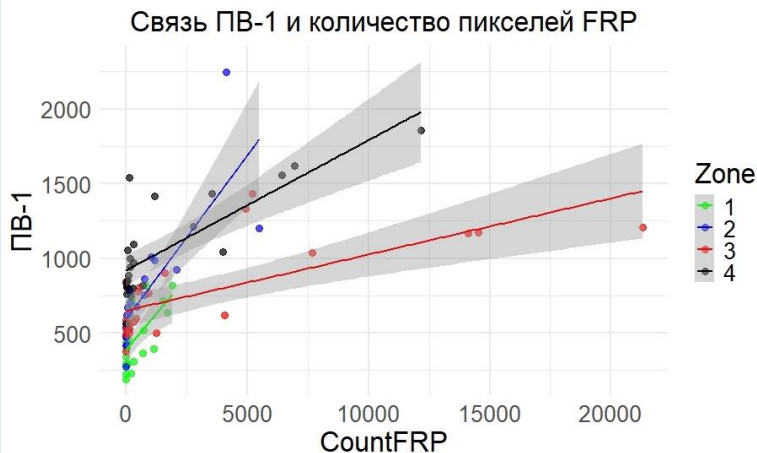
Результаты. Динамика годовых сумм FRP по секторам



Результаты. Среднемноголетние значения исследуемых параметров

Сектор	FRP, $\cdot 10^5$ МВт	Горимость, %	ГТК, ед.	ПВ-1
I	1,77 \pm 0,73	0,29	1,07 \pm 0,14	471 \pm 81
II	2,68 \pm 1,73	0,22	1,2 \pm 0,19	755 \pm 160
III	10,68 \pm 7,45	0,67	0,81\pm0,14	777\pm125
IV	6,82 \pm 4,86	0,62	0,63 \pm 0,09	1070 \pm 139

Результаты. Корреляционная матрица для исследуемых параметров

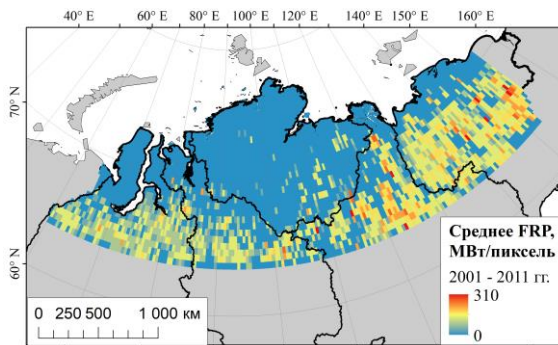


Сектор	Параметр	ГТК	ПВ-1
I	FRP (сумм)	-0,40	0,55
	FRP (колич.)	-0,41	0,58
II	FRP (сумм)	-0,55	0,74
	FRP (колич.)	-0,59	0,79
III	FRP (сумм)	-0,52	0,67
	FRP (колич.)	-0,54	0,71
IV	FRP (сумм)	-0,44	0,76
	FRP (колич.)	-0,51	0,78

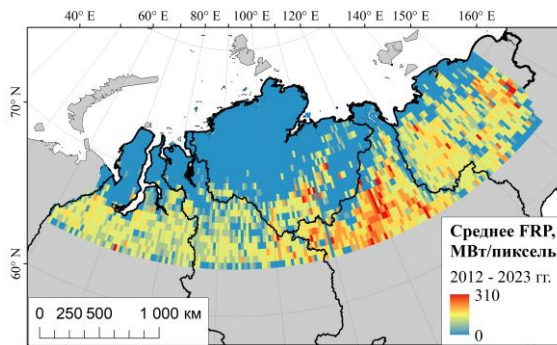
FRP (сумм) – среднегодовая сумма FRP, МВт/год

FRP (колич.) – среднегодовое количество пикселей FRP, пиксели/год

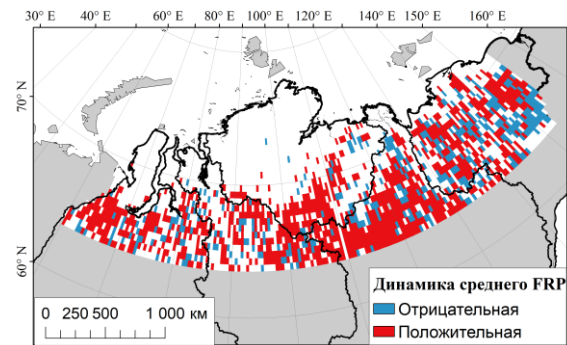
Результаты. Динамика среднегодового FRP на пиксель за 23-летний интервал наблюдений



Среднее FRP за 2001–2011 гг., МВт/пиксель

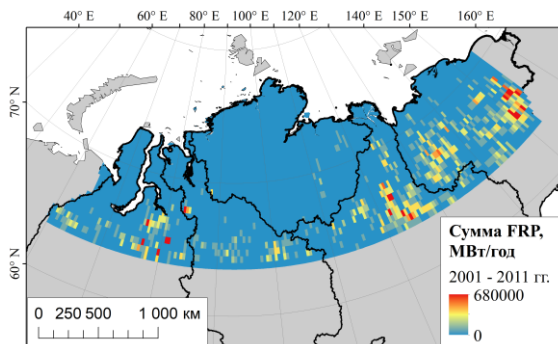


Среднее FRP за 2012–2023 гг., МВт/пиксель

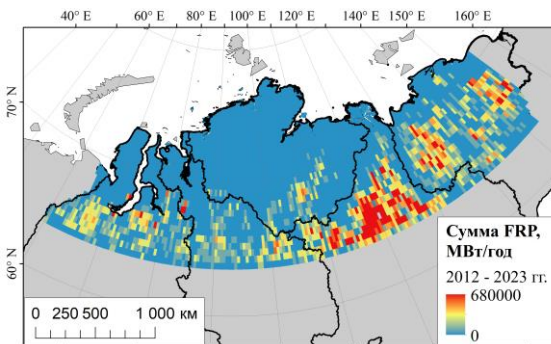


Динамика среднего FRP (2012–2023)–(2001–2011), МВт/пиксель

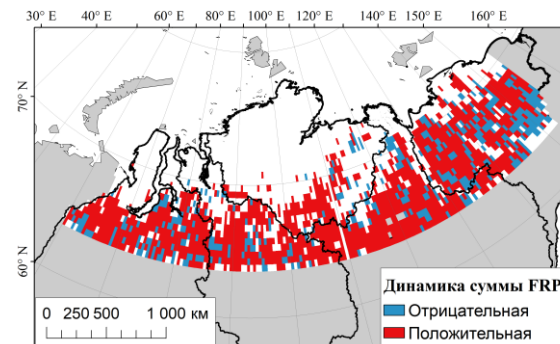
Результаты. Динамика среднегодовой суммы FRP за 23-летний интервал наблюдений



Среднегодовая сумма FRP за 2001–2011 гг., МВт/год



Среднегодовая сумма FRP за 2012–2023 гг., МВт/год



Динамика среднегодовой суммы FRP (2012–2023)–(2001–2011), МВт/12 лет

Выводы

- Обобщая пространственное распределение динамики теплоизлучения от пожаров за последние 20 лет можно констатировать, что значительная часть арктической зоны Сибири характеризуется положительным трендом горимости и теплоизлучения от пожаров. Следовательно, можно прогнозировать дальнейший рост интенсивности пожаров.
- Высокий коэффициент корреляции (**0,55 – 0,78**) между FRP и показателем ПВ – 1 позволяет прогнозировать, что в современных климатических условиях интенсивность пожаров определяет интенсификация процессов сушки ЛГМ в условиях роста температур и изменения режима увлажнения. Этому же будет способствовать повышение аридности климата в связи с тем, что корреляция между FRP и ГТК имеет обратный характер (**–0,59 – –0,40**).

Выводы

- В северо-западной части Сибири наблюдается минимальная мощность теплоизлучения (I сектор – $(1,77 \pm 0,73) \cdot 10^5$ МВт).
- При продвижении на восток значение FRP увеличивается (II сектор – $(2,68 \pm 1,73) \cdot 10^5$ МВт). При этом, во II секторе наблюдается минимальная горимость – **0,22%**.
- В северо-восточной части Сибири (III сектор) зафиксирована максимальная мощность теплоизлучения, равная $(10,68 \pm 7,45) \cdot 10^5$ МВт. Это согласуется с максимальной горимостью (**0,67%**) на данной территории.
- В секторе IV зафиксировано максимальное значение ПВ –1 (1070 ± 139), при этом значения FRP ($(6,82 \pm 4,86) \cdot 10^5$ МВт) и показателя горимости (**0,62%**) остаются на достаточно высоком уровне, что говорит о высоком уровне пожарной опасности в данном регионе.

Спасибо за внимание!