



XIX Международная конференция  
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ  
ИЗ КОСМОСА»  
Москва, ИКИ РАН, 15–19 ноября 2021 г.

# Тренды эмиссий углерода на основе спутниковых данных о пожарах Сибири

Евгений ПОНОМАРЁВ<sup>1,2</sup>,  
Е. Швецов<sup>1</sup>, Т. Пономарева<sup>1,3</sup>, Н. Якимов<sup>2,3</sup>, А. Мальканова<sup>2,3</sup>,  
А. Забродин<sup>2,3</sup>, О. Якубайлик<sup>3</sup>

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

По темам базового проекта № 0356-2019-0009 и 0287-2019-0006 ;  
РФФИ, Правительство Красноярского края,  
Красноярский краевой фонд науки № 20-44-242002



# Введение

---

Температурные аномалии, изменение режима осадков, устойчивые антициклоны – комплекс факторов, определяющих современную **динамику пожарных режимов в Сибири.**

Конец XX –начало XXI в. характеризуются **положительным трендом** числа и площадей пожаров. До 70–90 % пожаров в РФ фиксируется в Сибири.

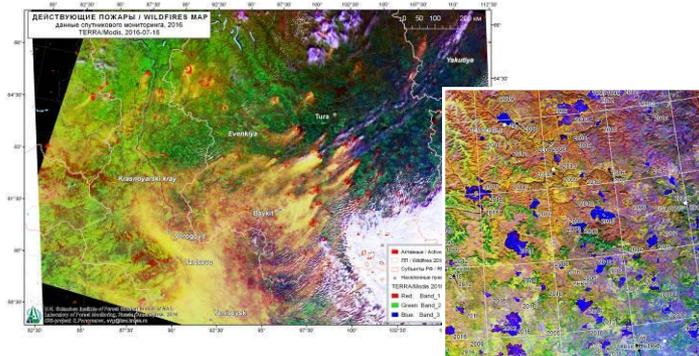
Согласно прогнозам, **пожарные эмиссии углерода**, которые в настоящее время составляют ~100 Тг/год, при современных темпах могут значительно увеличиться во второй половине XXI века, в зависимости от реализуемого **климатического сценария ИРСС.**

**Цель: разработка методов инструментальной оценки и прогнозирования** пожарных эмиссий на основе оперативных спутниковых данных для развития системы экологического мониторинга.

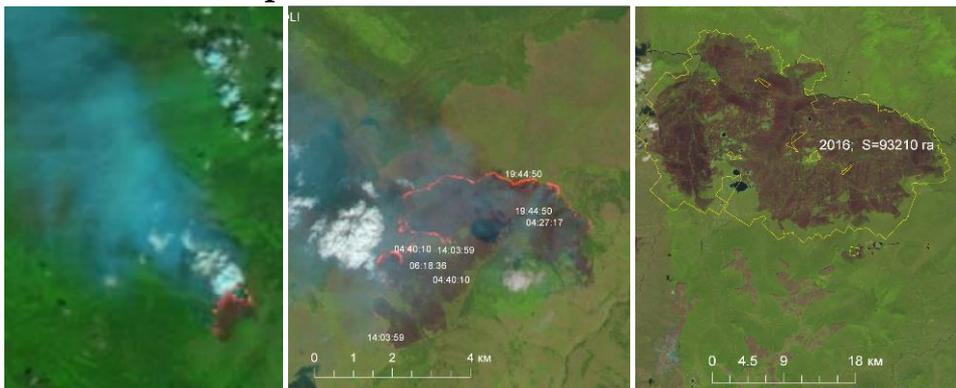


# Материалы спутникового мониторинга пожаров

**А** Исходная информация



Пожары и послепожарная мозаичность территории. Terra/MODIS

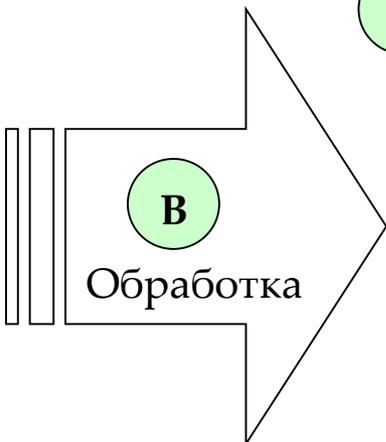
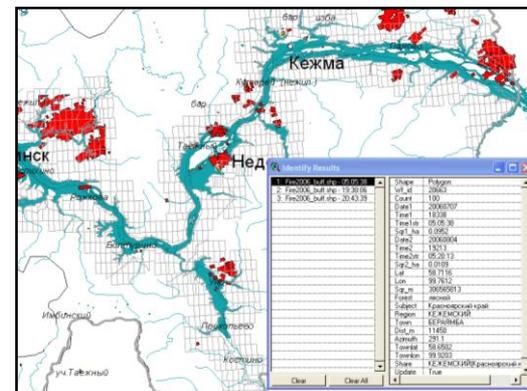


Terra/MODIS

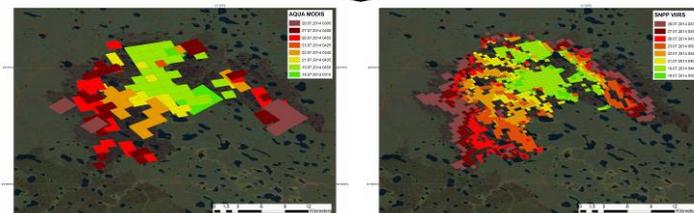
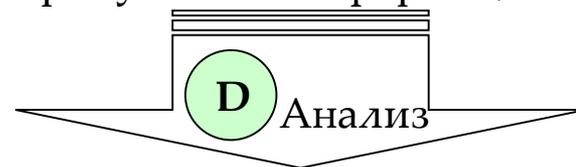
Landsat-8/OLI

Sentinel-2

**С** Итоговая база данных



Временной интервал: **1996–2021** гг.;  
 Объем данных: **~3×10<sup>6</sup>** записей;  
 Формат представления: векторные ГИС-слои, атрибутивная информация



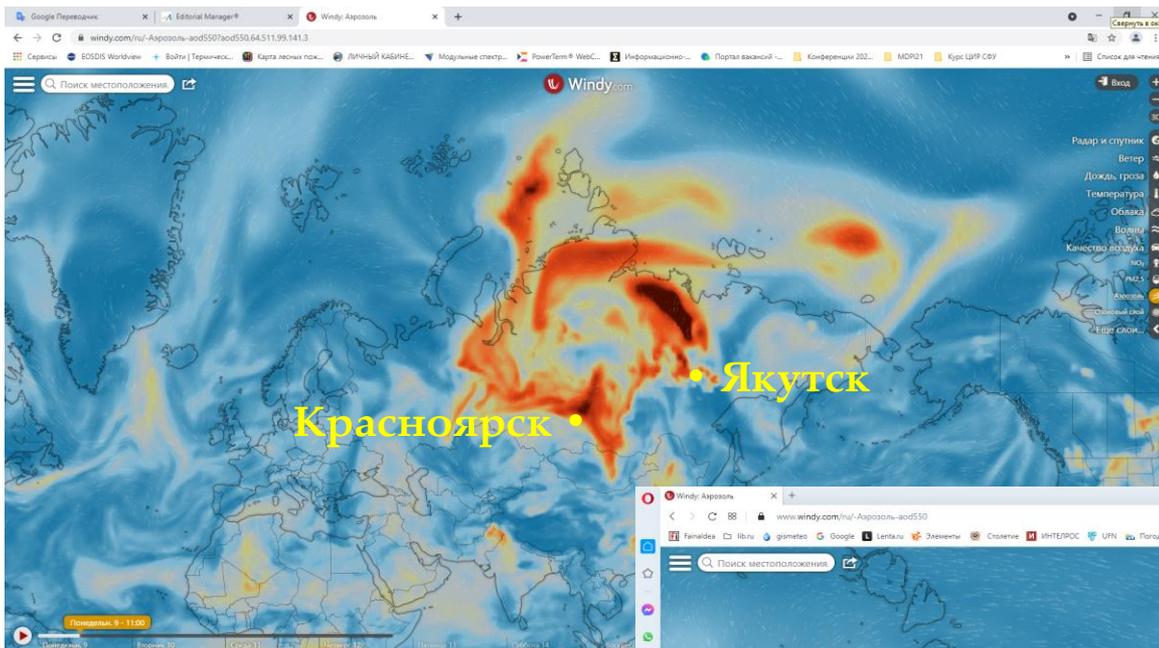
AQUA/Modis

SNPP/VIIRS

## Рост пожарных статистик ( $\langle x \rangle \pm \sigma$ , $p < 0.05$ )

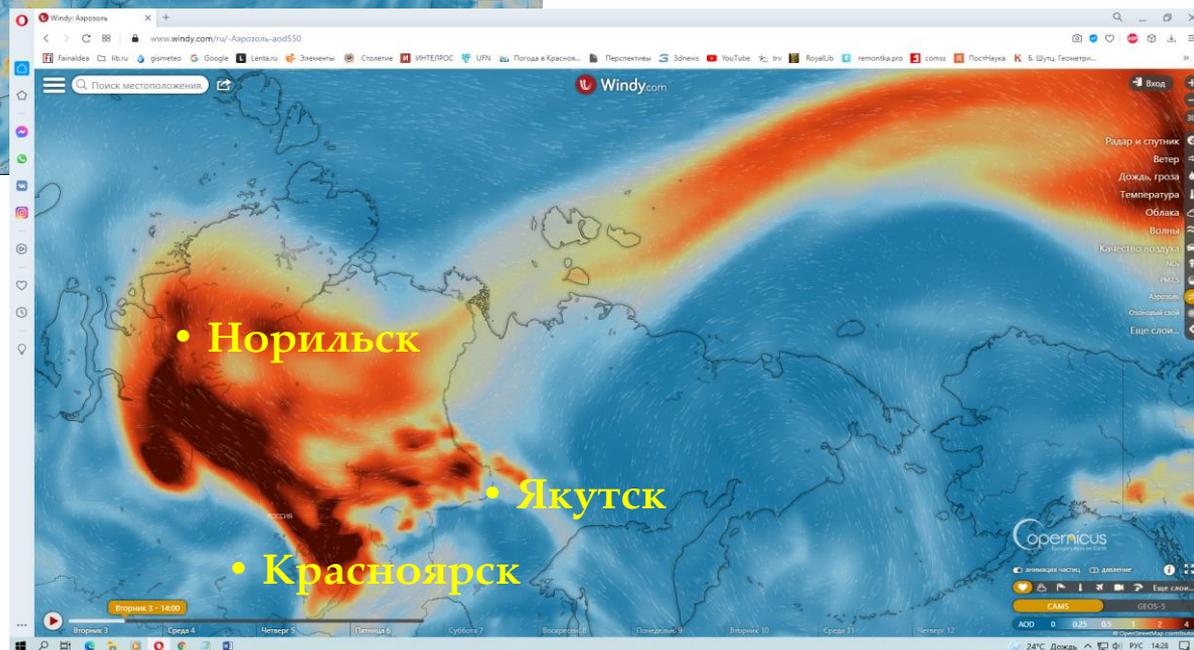
Интервалы	Число пожаров, ×1000	Годовая площадь, млн га
2001–2005	11.18 ± 5.07	6.32 ± 3.83
2006–2010	19.72 ± 3.56	7.56 ± 2.12
2011–2015	17.30 ± 4.30	15.40 ± 4.09
2016–2020	13.72 ± 2.44	16.06 ± 6.84
Среднее за 20 лет	15.48 ± 2.33	11.34 ± 2.88

# Аэрозоли над территорией Сибири в 2021 г.

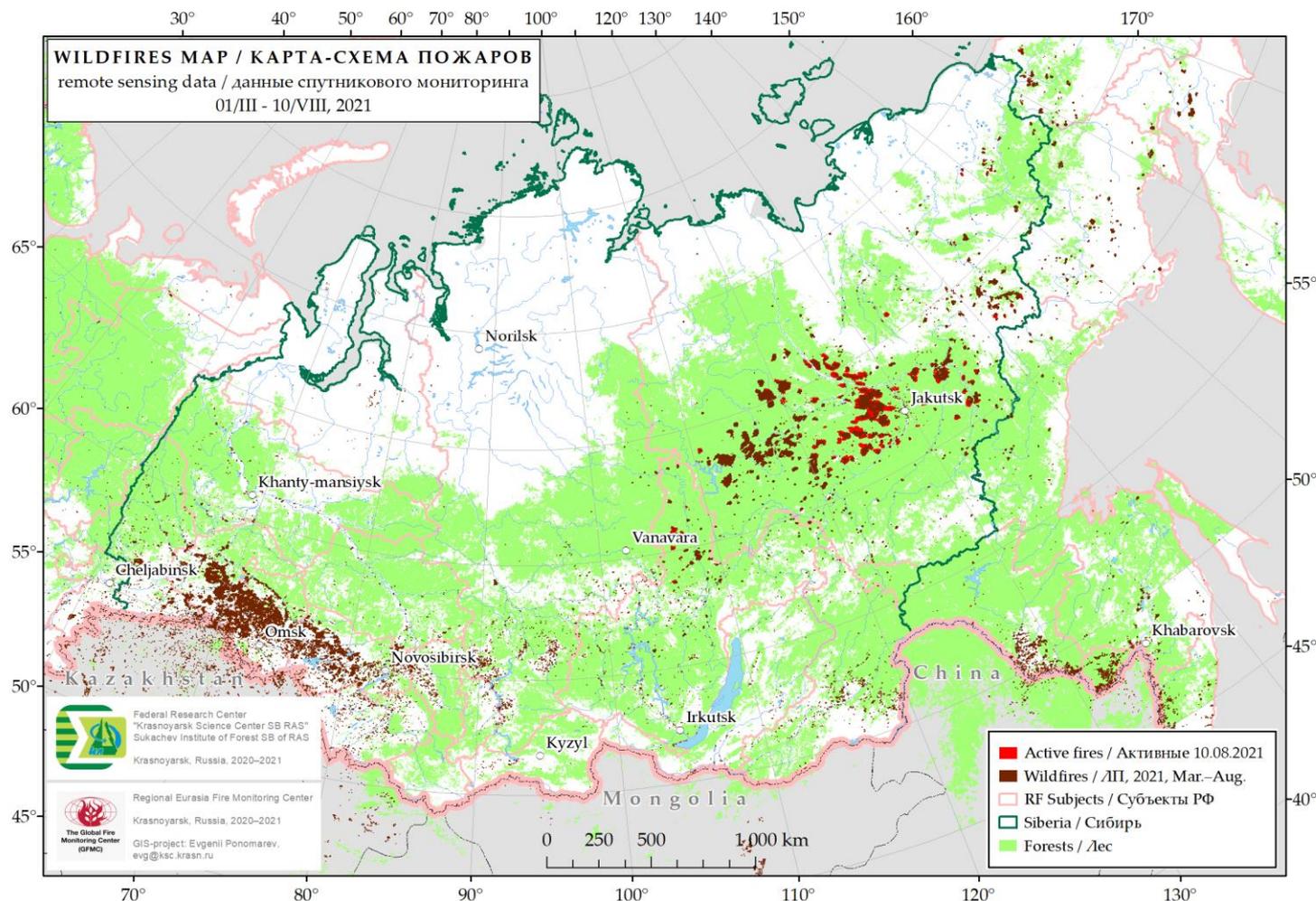


Открытый ресурс  
Windy Community

<https://www.windy.com/>



# Пространственное распределение пожаров 2021



Предварительно эмиссии от пожаров 2021 г. – **270–300 Тг С**

# Метод оценки эмиссий в пересчете на углерод

Входные параметры по  
*Seiler, Crutzen, 1980*

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



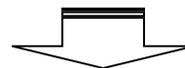
$$C = A \times B \times CE \times \beta$$

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

Seiler, W.; Crutzen, P.J. 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>

Учет переменной интенсивности по  
*Ponomarev et al. 2019, 2021*

Оценка теплоизлучения (FRP)  
активной зоны /  
классификация полигона  
пожара по интенсивности



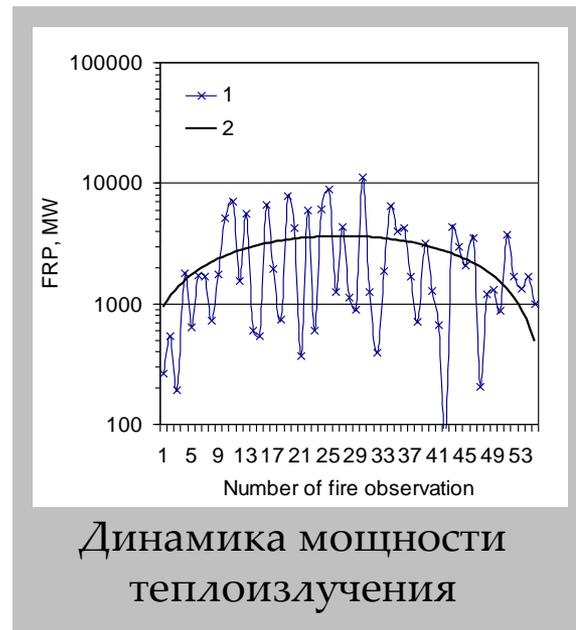
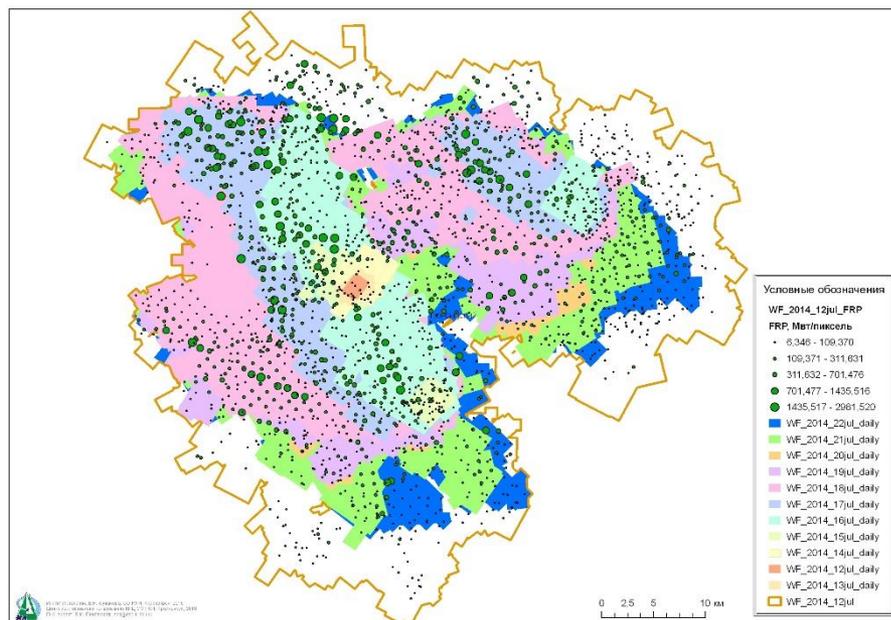
$$C = A (FRP_i) \times \beta_i (FRP_i) \times B_i (FRP_i) \times CE$$

- 1) Учет специфики горения в лесах Сибири
- 2) Адаптированная оценка массы сгорающих ЛГМ (кг)
- 3) Адаптированный метод оценки прямых пожарных эмиссий ( $Tt C/год$ )

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



# Мощность теплоизлучения активных зон

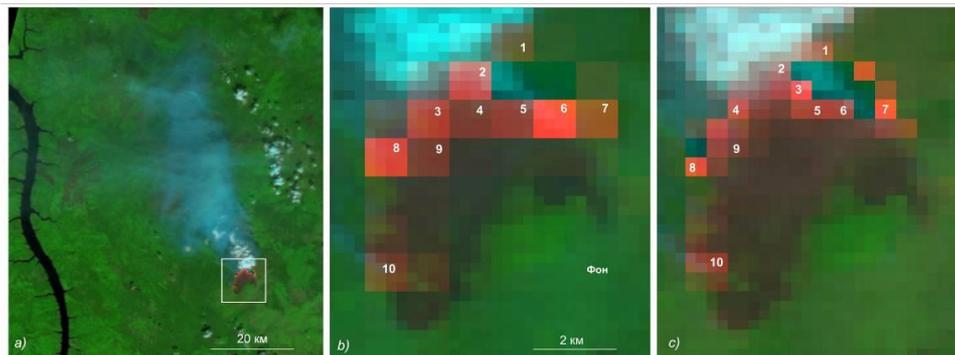


Мощность теплоизлучения активной зоны (FRP Fire Radiative Power) из продуктов MOD14/MYD14 (Terra, Aqua/MODIS, <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)

Мощность теплоизлучения **линейно связана с количеством сгоревшей биомассы** (Wooster *et al.*, 2002).

Численно показано (Пономарев *и др.*, 2017, 2018), что варьирование FPR обеспечивают сценарий протекания пожара (удельная скорость выгорания 0.01 – 0.1 кг/м<sup>2</sup>с, скорость распространения фронта 0.01 – 0.1 м/с).

# Классификация пожаров по интенсивности



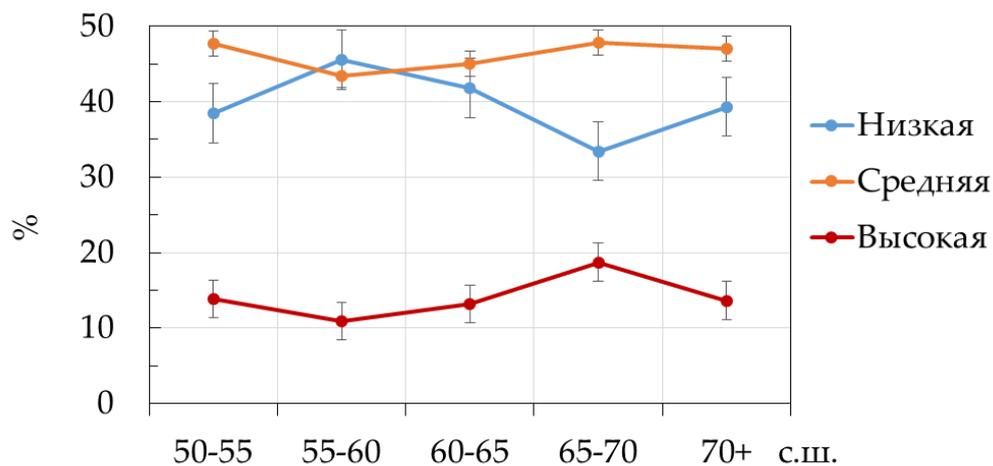
Квантили интенсивности  
(пороговый метод):

I)  $< FRP_{cp} - \sigma$ ,

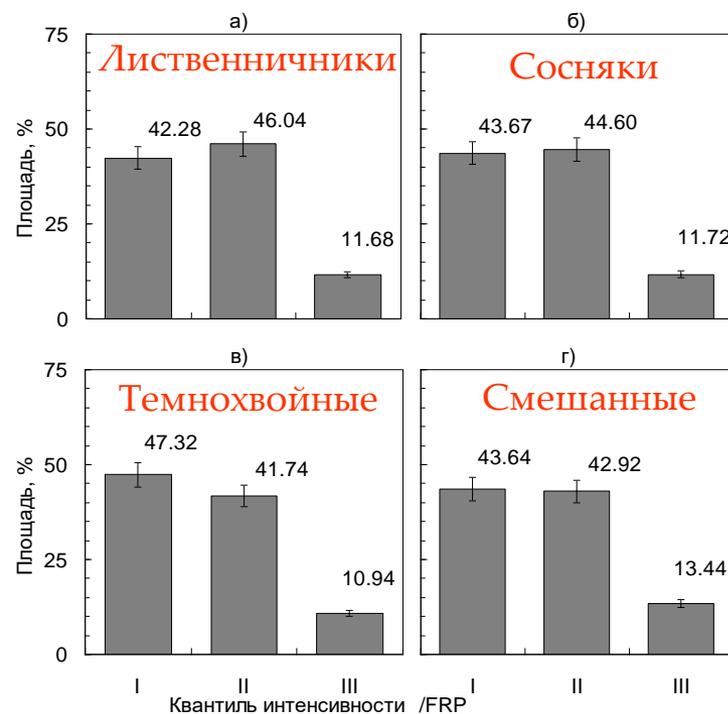
II) от  $FRP_{cp} - \sigma$  до  $FRP_{cp} + \sigma$ ,

III)  $> FRP_{cp} + \sigma$

$FRP_{cp}$  – среднее значение по полигону  
пожара,  $\sigma$  – стандартное отклонение



Широтное распределение  
пожаров по интенсивностям



# Средне многолетние данные пожарных эмиссий

Древостои	Тг С/год	% от всех пожарных эмиссий
<b>Лиственничники</b> ( <i>Larix sibirica</i> , <i>L. dahurica</i> , <i>L. cajanderi</i> )	43.0–52.0	<b>51.6–62.4</b>
<b>Сосняки</b> ( <i>Pinus sylvestris</i> )	11.0–12.0	13.2–14.2
<b>Лиственные</b> ( <i>Populus tremula</i> and <i>Betula</i> spp.)	1.9–3.1	2.3–3.7
<b>Темнохвойные</b> ( <i>Pinus sibirica</i> , <i>Abies sibirica</i> , <i>Picea obovata</i> )	3.8–5.0	4.5–5.7
<b>Тундра</b> (>65°с.ш.)	0.5–2.0*	<b>0.5–1.0</b>

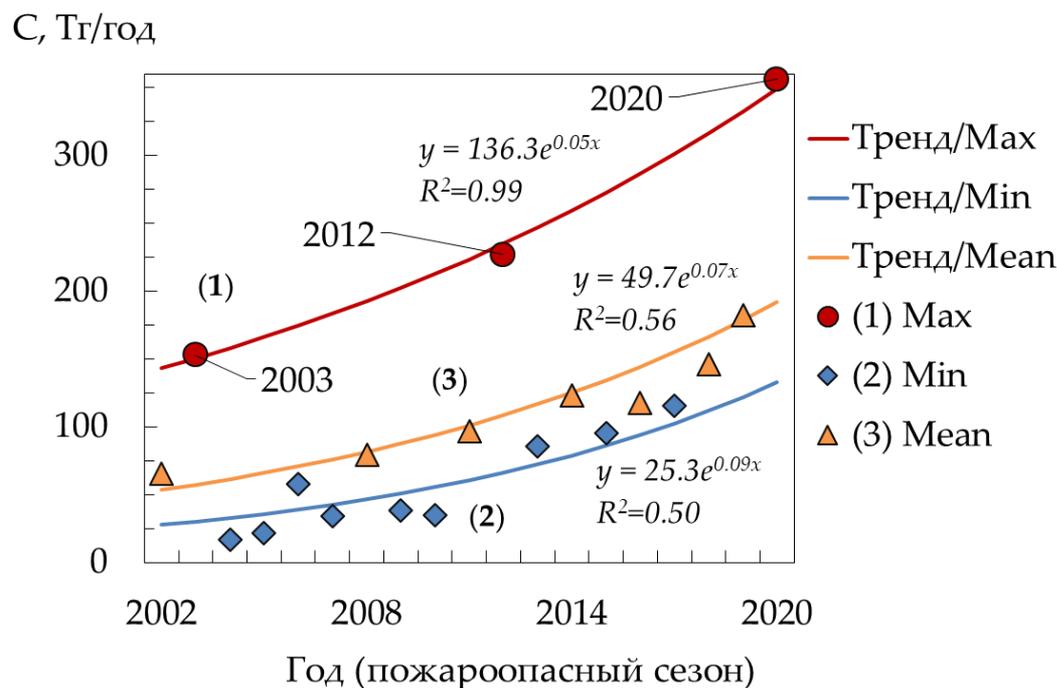
\* Не включены данные для 2020 (3.7 Тг С/год), которые в 5 раз превышают средне многолетние оценки (0.58±0.35) для зоны 65+N

Ежегодные прямые эмиссии от пожаров в Сибири **90 ± 21 Тг С/год**.

Диапазон варьирования от **20–40 Тг С/год** до **250–350 Тг С/год** (2012, 2020 гг.).

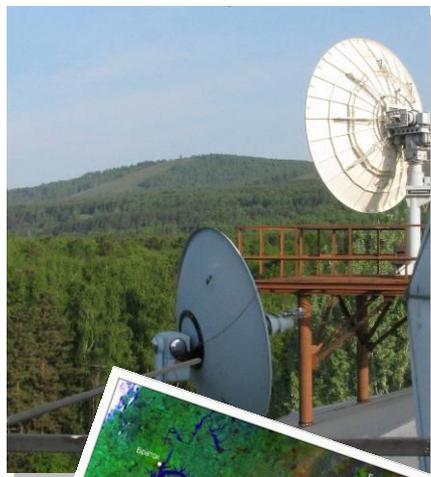
# Тренды пожарных эмиссий

Модельные тренды для пожарных сезонов с горимостью: экстремальной (Max trend), умеренной (Mean trend) и низкой (Min trend)



Моделирование для второй половины XXI в. показывает рост уровня эмиссий: до  $250 \pm 30$  Тг С/год для сезонов высокой горимости и до  $110 \pm 20$  Тг С/год в случае умеренной горимости. Экстремальные оценки в случае реализации экстремального климатического сценария IPCC (RPS 8.5) для Сибири – 1200–1500 Тг С/год.

# Выводы

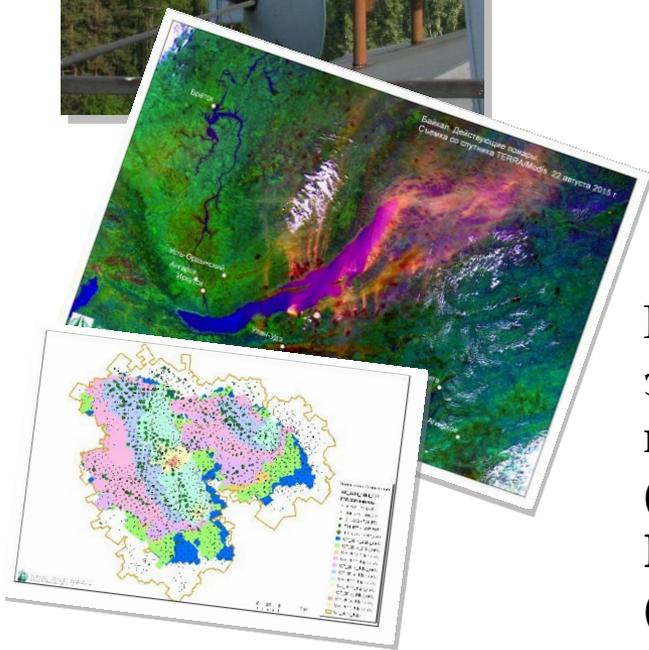


Оценка прямых пожарных эмиссий –  $90 \pm 21$  Тг С в год. Диапазон варьирования от 20–40 Тг С/год до 220–350 Тг С/год.

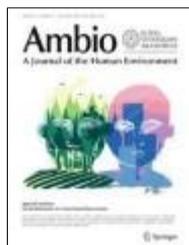
Вклад низко-, средне- и высокоинтенсивных пожаров на уровне 33–37%, 47–49%, 14–17% соответственно.

Прямые эмиссии от пожаров Сибири через площади пожаров и характеристики горения (интенсивность, FRP) определяются трендами повышения температур.

При сохранении трендов температур пожарные эмиссии во второй половине XXI в. увеличатся вдвое при реализации «мягкого» сценария IPCC (RCP2.6, повышение температуры на  $0.3\text{--}1.7^\circ\text{C}$ ); Моделирование для «жесткого» сценария (RCP8.5, возрастание на  $2.6\text{--}4.8^\circ\text{C}$ ) показывает рост до 1200–1500 Тг С/год.



# Публикации по теме



Kharuk V.I., Ponomarev E.I., Ivanova G.I., Dvinskaya M.L., Coogan S.C.P., Flannigan M.D. Wildfires in the Siberian taiga // **Ambio**. A Journal of the Human Environment. 2021. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>

Submit to this Journal  
Review for this Journal  
Edit a Special Issue

Article Menu  
Article Overview  
Article Versions  
Related Info Links  
More by Authors Links  
Full Article Text  
Introduction  
Materials and Methods

Open Access Article  
**Current Trend of Carbon Emissions from Wildfires in Siberia**  
by Evgenii Ponomarev<sup>1,2,\*</sup>, Nikita Yakimov<sup>1,2</sup>, Tatiana Ponomareva<sup>2,3</sup>, Oleg Yakubailik<sup>1,2</sup> and Susan G. Conard<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Federal Research Center "Krasnoyarsk Science Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences", Krasnoyarsk 660036, Russia  
<sup>2</sup> Department of Ecology and Environment, Siberian Federal University, Krasnoyarsk 660041, Russia  
<sup>3</sup> V.N. Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk 660036, Russia  
<sup>4</sup> Department of Geography and Geoinformation Science, Affiliate Faculty, George Mason University, Fairfax, VA 22030, USA  
\* Author to whom correspondence should be addressed.

Academic Editors: Anthony R. Lupo and Chris G. Tzanis  
*Atmosphere* 2021, 12(5), 559; <https://doi.org/10.3390/atmos12050559>  
Received: 31 March 2021 / Revised: 17 April 2021 / Accepted: 23 April 2021 / Published: 26 April 2021  
(This article belongs to the Special Issue *Selected Papers from the Third International Electronic Conference on Atmospheric Sciences*)

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. <https://doi.org/10.3390/atmos12050559>



Патент на изобретение, RU 2755936 C1, 2021  
Способ расчета прямых пожарных эмиссий углерода с учетом пороговой классификации интенсивности пожара растительности по спутниковым съемкам в ИК диапазоне // Приоритетная справка №2021101845 от 28.01.2021.