

**Уточнение оценок объёмов атмосферных выборосов от  
лесных пожаров в Сибири по данным наземных  
наблюдений и спутниковым картам древесных пород**



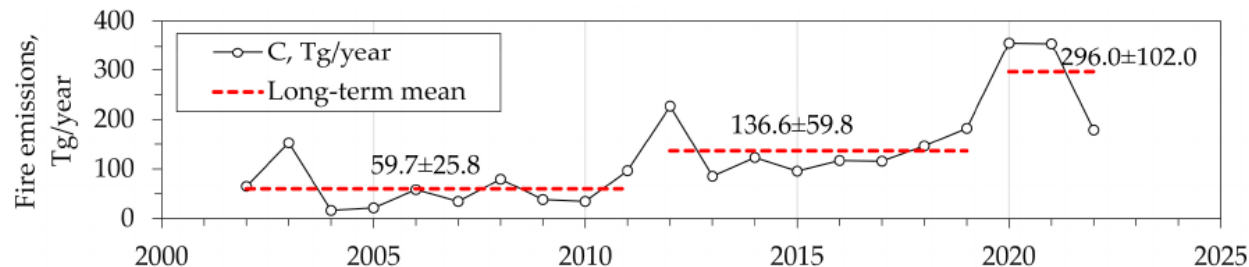
*Васильева А.В.<sup>1</sup>, Моисеенко К. Б.<sup>1</sup>, Скороход А.И.<sup>1</sup>, Беликов И. Б.<sup>1</sup>,  
Лаврова О.В.<sup>1,2</sup>, Панкратова Н.В.<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Лаборатория газовых примесей атмосферы,  
Институт Физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва*

*<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта,  
Москва*

*Москва, ИКИ, ноябрь 2024*

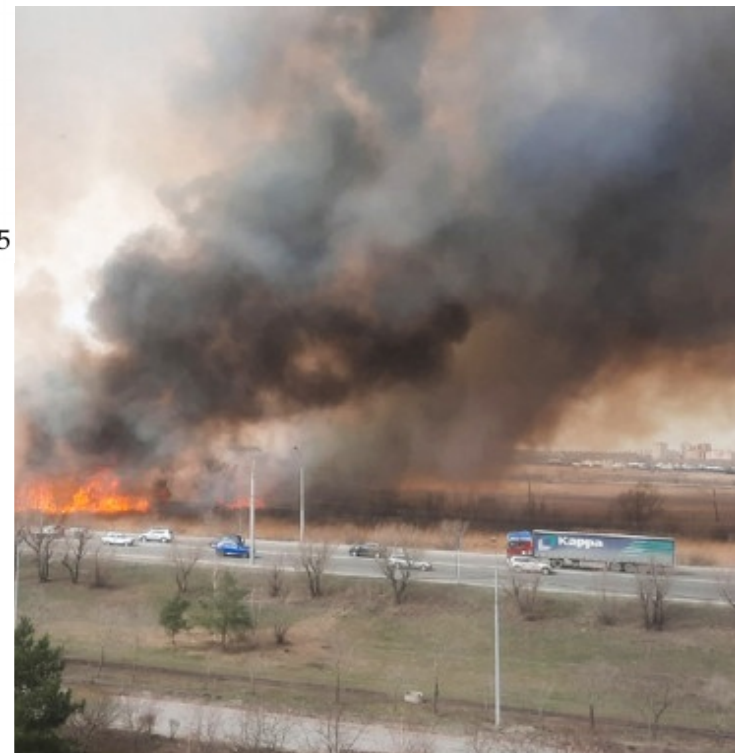
## Рост пожарной активности в Сибири



*Fire* 2023, 6(7), 246; <https://doi.org/10.3390/fire6070246>

Масса ежегодных выбросов углерода от природных пожаров в Сибири в 2002–2022 гг (по спутниковым данным о мощности теплового излучения). Источник: [Ponomarev et al. Wildfire Intensity and Fire Emissions in Siberia. Fire, 2023](#), Институт Леса им. Сукачёва СО РАН, Красноярск.

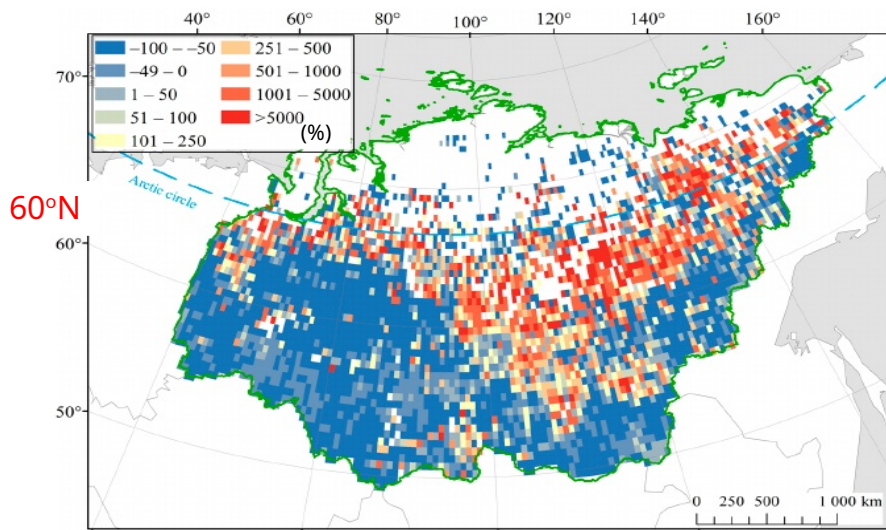
→ Ежегодное **количество возгораний, площади выгоревших территорий и суммарная масса выбросов** углерода от природных пожаров в Сибири выросли в 2–3 раза в 2011–2020 гг в сравнении с 2001–2010 гг (Kharuk et al., 2022; Ponomarev et al., 2023).



Омск, апрель 2022

Фото: inci55 / VK / rbc.ru

## Катастрофические пожары “идут” на север



Fire 2023, 6(7), 246; <https://doi.org/10.3390/fire6070246>

Процентное изменение средней интенсивности пожаров (по мощности теплового излучения) в Сибири в 2002–2013 гг в сравнении с 2002–2012 гг. Источник: Ponomarev et al. *Wildfire Intensity and Fire Emissions in Siberia*. *Fire*, 2023. Институт Леса им. Сукачёва СО РАН, Красноярск.

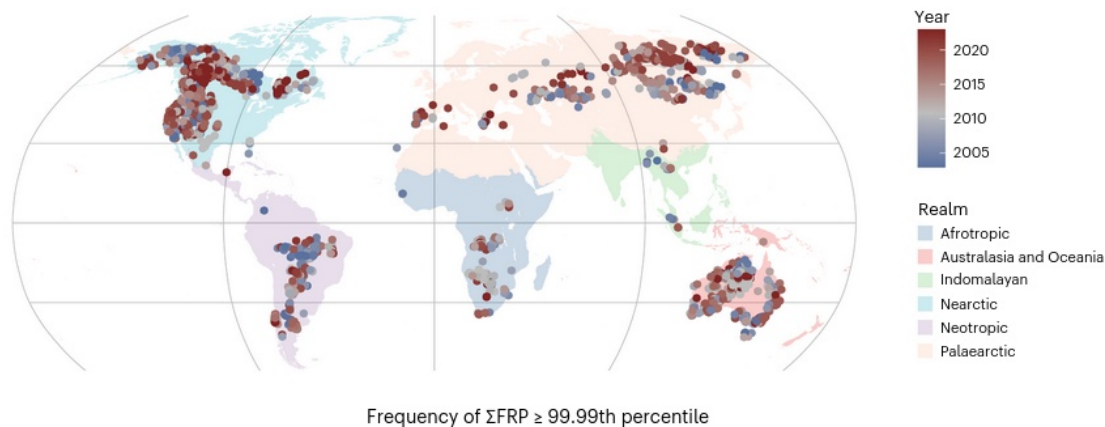
→ С 2010-х к северу от 60°N растут выгоревшие площади, доля пожаров с высокой интенсивностью, интенсивность пожаров, объёмы атмосферных выбросов (Ponomarev et al., 2023; Zhu et al., 2021).

→ Точный химический состав выбросов от природных пожаров в Сибири до сих пор крайне мало изучен.

→ Оценки суммарных выбросов от пожаров кратно варьируют в разных источниках (Матвеев и Барталев, 2023).

→ Сочетание новых наземных и спутниковых данных (продуктов) может снизить неопределённости в оценках эмиссий.

## Бореальные пожары как глобальная угроза



Миграция экстремальных пожаров (верхние 0.01% суммарной день мощности теплового излучения, FRP, в ячейках сетки 0.2x0.2°, почти 3000 пожаров) в мире с 2003 по 2023 гг. Источник: [Cunningham et al. Increasing Frequency and Intensity of the Most Extreme Wildfires on Earth. Nat. Ecol., Evolution. Brief Commun., 2024. Univ. of Washington, USA.](#)

→ Глобально частота экстремальных пожаров выросла за 20 лет более чем в два раза.

→ С 2010 г растёт доля бореальных пожаров в общем числе экстремальных пожаров (с учётом площади региона).

→ Растёт средняя мощность теплового излучения в 20-ке самых экстремальных пожаров за каждый год.

## Негативные эффекты выбросов продуктов горения биомассы

### Ухудшение качества воздуха (смог)

→ Тяжёлые смоговые ситуации в Якутске (350 тыс. чел.) в 2021 г. Дым от пожаров в Восточной Сибири может достичь Северной Америки (Laing et al., 2016) и густонаселённых районов Юго-Восточной Азии (Sun et al., 2023) вызывая рост смертности населения и экономические убытки (Yasunari et al., 2024).

### Потепление Арктики (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, аэрозоли)

→ Лесные пожары на юге Сибири весной и летом являются источником до 50% чёрного углерода, который осаждается к северу от 75° с.ш., снижая альбедо подстилающей поверхности и ускоряя таяние снега (Generoso et al., 2007; Kostrykin et al., 2021; Stohl et al., 2007).

### Наработка озона

→ При участии продуктов горения биомассы в тропосфере вырабатывается озон, который наносит непосредственный вред здоровью людей, животных и растений (Yue & Unger, 2018), а также влияет на атмосферное время жизни других загрязнителей (Seinfeld & Pandis, 1997).

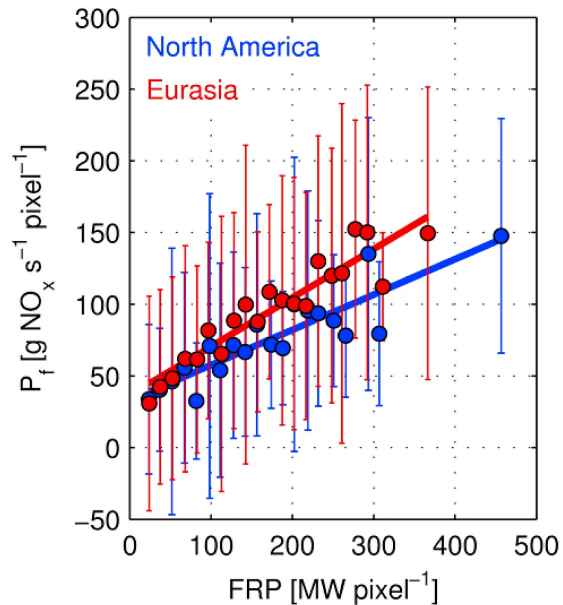


**Fig. 2.** View from the Zeppelin station (a) under clear conditions on 26 April, and (b) during the smoke episode on 2 May 2006. Image courtesy of Ann-Christine Engvall.

Stohl et al., 2006. Arctic smoke – record high air pollution levels in the European Arctic due to agricultural fires in Eastern Europe in spring 2006.

## Региональные различия состава выбросов от природных пожаров

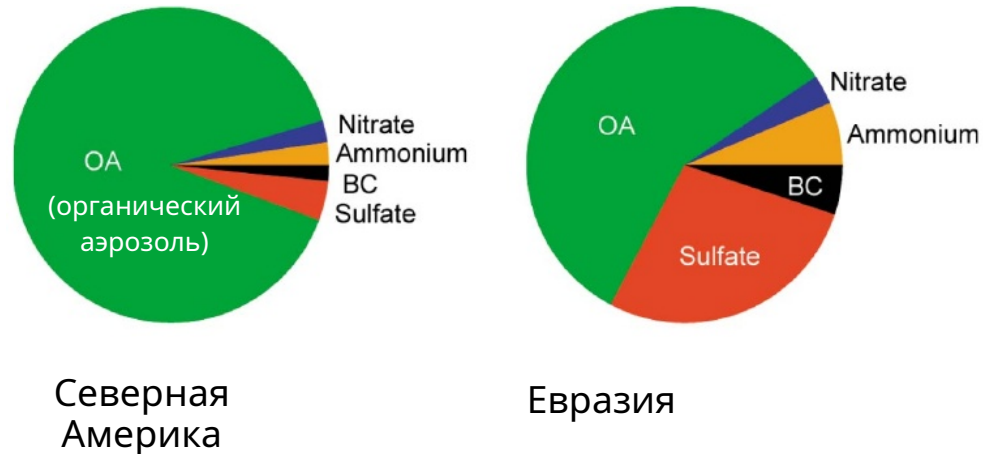
### Малые газы (NO<sub>x</sub>)



Средняя интенсивность выбросов NO<sub>x</sub> от пожаров в бореальных лесах Евразии и Северной Америки

Авторы: Dr. Stefan Schreier et al. Differences in Satellite-Derived NO<sub>x</sub> Emission Factors Between Eurasian and North American Boreal Forest Fires. *Atm. Env.*, 2015

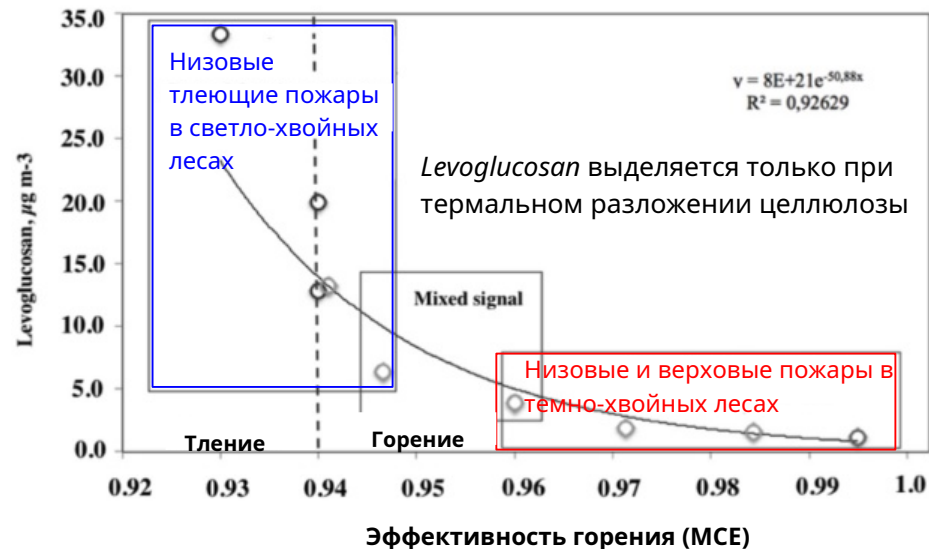
### Аэрозоли



Состав аэрозоля в шлейфах лесных пожаров в Канаде и Евразии в экспедиции NASA ARCTAS (весна-лето 2008)

Источник: Prof. Yataka Kondo et al. Emissions of Black Carbon, Organic, and Inorganic Aerosols From Biomass Burning in North America and Asia in 2008. *J. Geophys. Res.*, 2011

## Субрегиональные различия выбросов от пожаров в Сибири: экстремальный сезон 2012 в ZOTTO

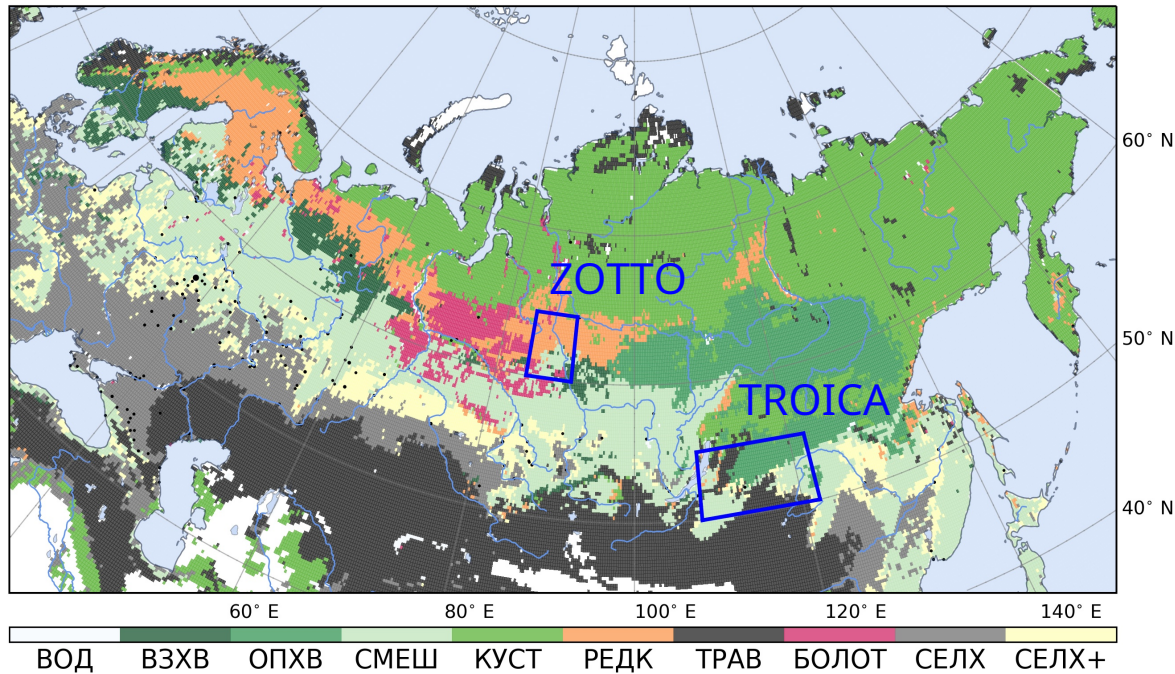


Авторы: др. Панов и др., Институт Леса, Красноярск  
Пожары в *темно-* и *светло-* хвойных лесах в 15–20 км от ZOTTO горят с разной интенсивностью и выбросом органики в разных пропорциях.

Авторы приводят средние коэффициенты эмиссий.

Мы рассмотрим состав эмиссий в **светло-** и **темно-** хвойных лесах Сибири по данным наземных наблюдений (предварительно).

## Мы сравнили состав выбросов от пожаров в темно- и светло- хвойных лесах в Сибири по данным наземных наблюдений



Source: NASA MODIS Global Land Cover Climatology, <https://lpdaac.usgs.gov/>

### Обсерватория ZOTTO

Измерения: CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>

Леса темно-хвойные (*Pinus Sibirica*)  
и светло-хвойные (*Pinus Sylvestris*).

### Ж/д экспедиции TROICA

Измерения: CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, BC,  
NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>

Светло-хвойные леса (*Larix sibirica*, *Pinus sylvestris*).



## Мы оценили пропорции выбросов ( $ER_{Y/X}$ ) которые...

→ характеризуют количество атмосферных выбросов газа  $Y$  ( $CO$ ,  $CH_4$ ,  $NO_x$ , и т.д.) на единицу выбросов эталонного газа  $X$  ( $CO_2$ ,  $CO$ ); у нас  $X = CO$ ;

→ оцениваются линейной регрессией разностей измеренных концентраций внутри и снаружи шлейфа:

$$ER_{Y/X} = (Y_{\text{шлейф}} - Y_{\text{фон}}) / (X_{\text{шлейф}} - X_{\text{фон}})$$

→ используются для оценки **коэффициента выбросов,  $F_x$** , характеризующего массу поступившего в атмосферу вещества  $X$  на 1 кг сгоревшей сухой биомассы:

$$F_x = 1000 * C_{\text{БИО}} * (M_x/12) * ER_{X/CO} / (1 + 1/ER_{CO/CO_2} + ER_{CH_4/CO} + ER_{BC/CO})$$

Средние  $F_{CO_2, CO, CH_4, NO_x}$  для бореальных лесов варьируют на 40–140% — источник погрешностей оценок эмиссий (Akagi et al., 2011; Andreae, 2019).



Сотрудник МЧС при тушении пожара в Якутии. © МЧС России. Источник: <https://1sn.ru/na-osobom-kontrole-mcs-naxodyatsya-lesnye-pozary-v-tryox-raionax-yakutii>

## Мы оценили эффективность горения, $MCE = 1 / (1 + ER_{CO/CO_2})$ , которая...

→ характеризует долю углерода, поступившего в атмосферу в виде  $CO_2$ , в общем количестве выброса углерода (в виде  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $NMHC$ , аэрозолей) в результате горения биомассы (точность оценки 5%);

→ характеризует преобладание в пожаре открытого горения ( $MCE \sim 0.99$ ) с выбросом  $CO_2$ ,  $NO_x$ ,  $BC$  или тления ( $MCE < 0.85$ ) с выбросом  $CO$ ,  $CH_4$  (Akagi et al., 2011);

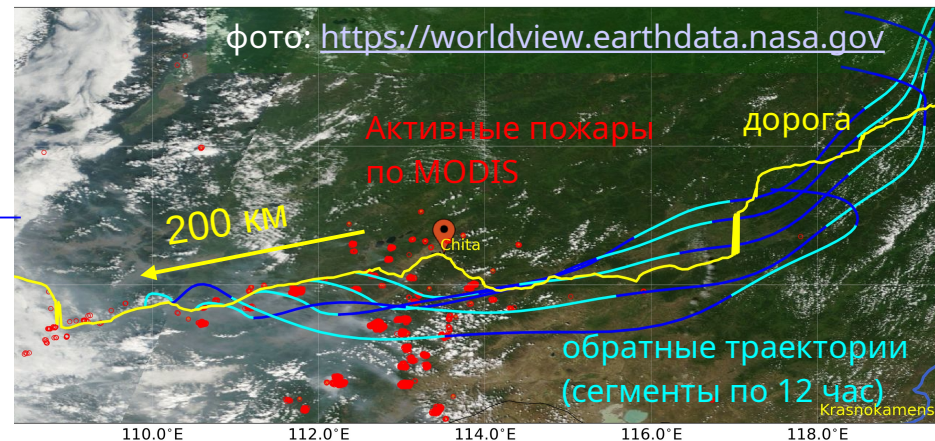
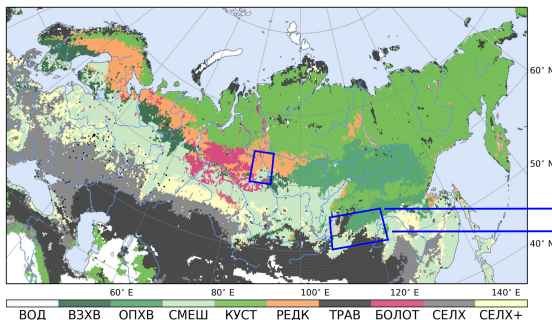
→ позволяет **сравнить оценки  $ER_{Y/X}$  в разных исследованиях** ввиду высокой корреляции между  $ER_{Y/X}$  и  $MCE$  (Ward & Hardy, 1991).



Фронт низового пожара с очагами открытого горения.

Фото: ГУ МЧС по Новосибирской области / rbc.ru

## TROICA: светлохвойный лес



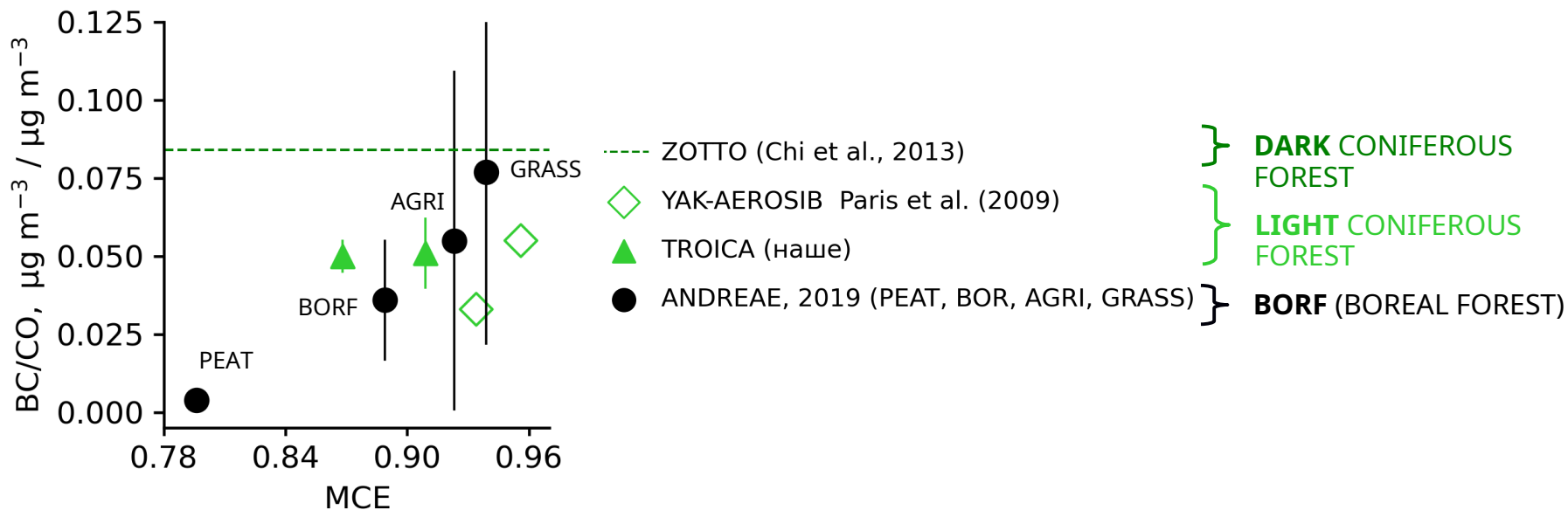
→ Положение точек активных пожаров MODIS вблизи ж/д соответствует участкам с наивысшими концентрациями продуктов горения в воздухе и высоким корреляциям между ними.

→ Спутниковые снимки дымовых шлейфов от пожаров NASA WorldView соответствуют фото и записям в дневнике экспедиции.

→ Вдоль обратных траекторий в течение 24–36 час переноса от мест наблюдений нет других крупных источников загрязнения.



## Оценки BC/CO в TROICA и др. (изменчивость)

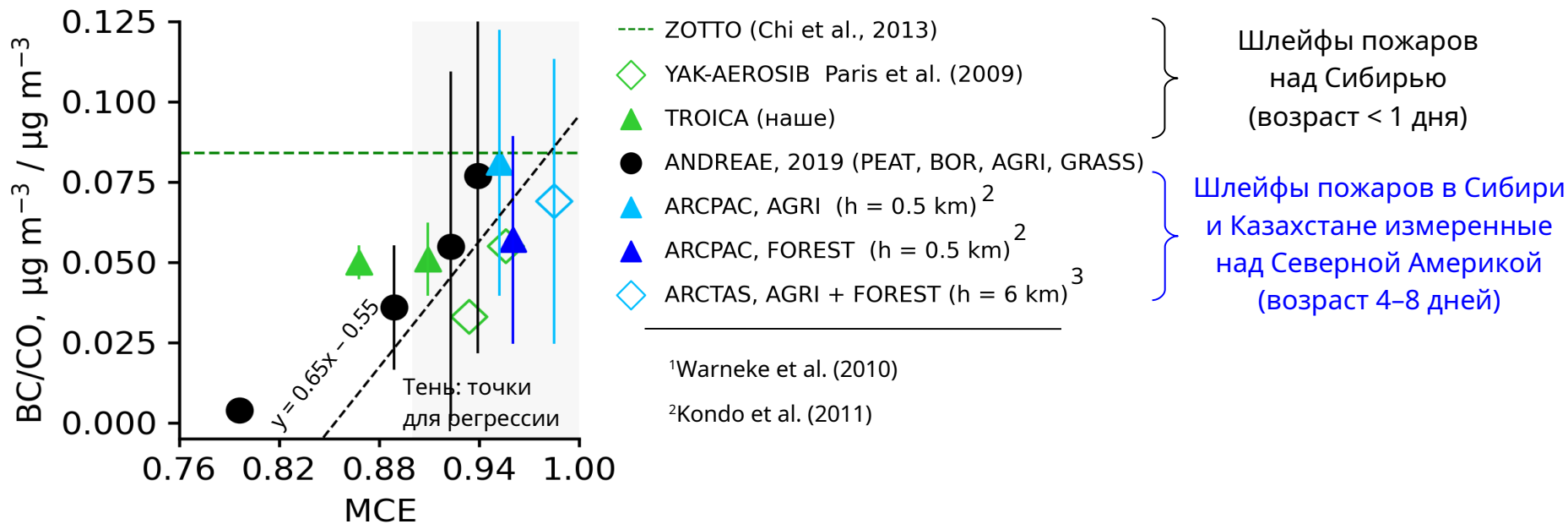


→ Среднее  $BC/CO_{BORF,ANDREA}$  (●) в 1.5 раза ниже нашего  $BC/CO_{LIGHT,TROICA}$  (▲) и  $BC/CO_{LIGHT,YAK-AEROSIB}$  (◇) по самолётным наблюдениям в Якутии в июле 2008 (Paris et al., 2009).

→ Среднее  $BC/CO_{LIGHT}$  = 4.7\* по TROICA (▲) и YAK-AEROSIB (◇) в 1.3 раза выше среднего  $BC/CO_{BORF,ANDREA}$  = 3.6\* (●) и в 2 раза ниже  $BC/CO_{DARK}$  = 8.4\* (---) по данным ZOTTO в июле 2007 (Chi et al., 2013).

\* Размерность [нг м<sup>-3</sup> / мкг м<sup>-3</sup>]

## Оценки ВС/СО в TROICA и др. (подобие)



→ Все BC/CO лежат вдоль одной прямой: свежие и дальние шлейфы, наземные и самолётные измерения, южная и северная тайга, лесные и с/х пожары.

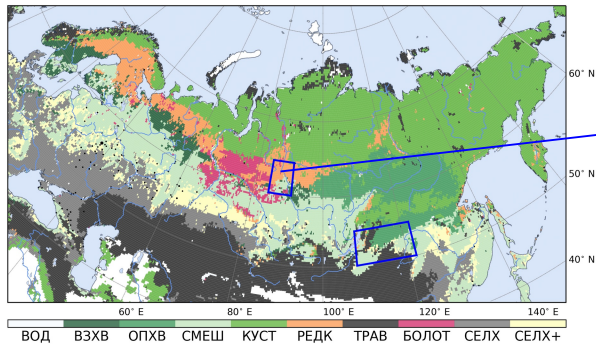
→ Sahu et al. (2012) сообщают о линейной зависимости между BC/CO и MCE для шлейфов лесных и с/х пожаров в Калифорнии летом 2008.

→ По мере накопления данных по BC/CO и  $MCE \sim CO_2/CO$ , можно будет оценивать эмиссии BC по наблюдениям  $CO_2$  и CO.

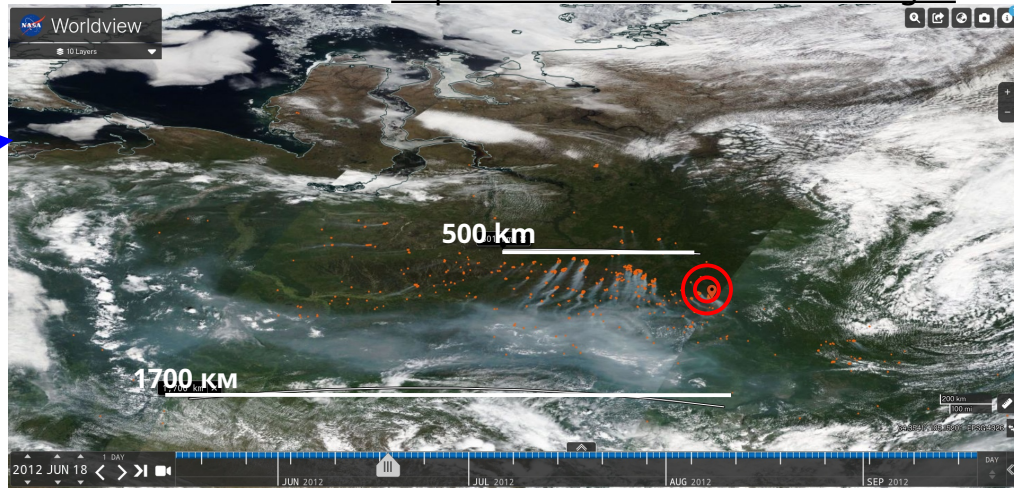


Vasileva et al., Emission ratios of trace gases and particles for Siberian forest fires..., *Atm. Chem. Phys.*, 2017

## ZOTTO: светло- и темно-хвойный лес



<https://worldview.earthdata.nasa.gov>

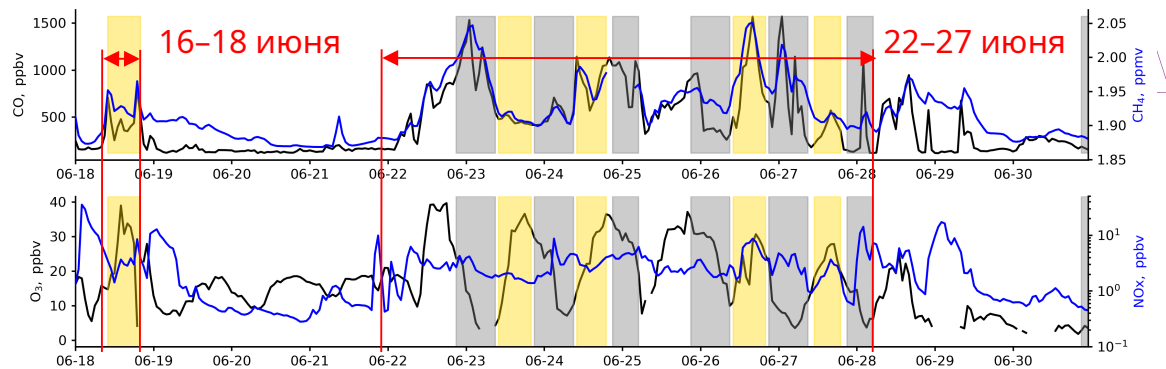


→ Июнь–июль 2012: аномальная жара, засуха, сухие грозы.

→ Пожары площадью в миллионы гектар, дым простирается на тысячи километров.

→ В ZOTTO шлейфы пожаров регистрировались 50% времени (Panov et al., 2018; Chi et al., 2013).

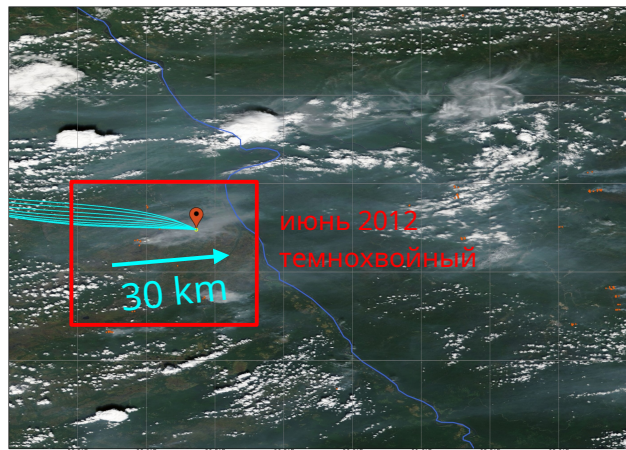
→ Ближайшие пожары в 15–150 км от ZOTTO, есть эпизоды регистрации отдельных шлейфов или группы шлейфов при подходящем ветре.



Шлейф пожара:  $\text{CO} > 180 \text{ ppbv}$ ,  $R_{\text{CO-CH}_4} > 0.5$ ,  $R_{\text{CO-NO}_x} > 0.5$ , **день**

## Экстремальные пожары в 2012 в ZOTTO

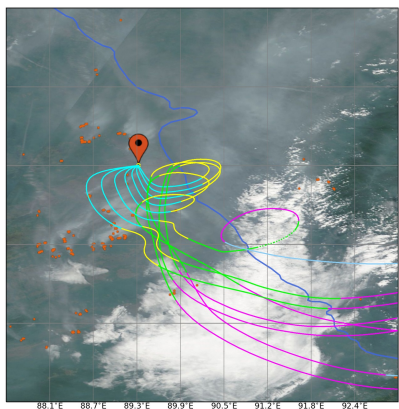
**F0:** 10 июня 2011, 3-ЮЗ, темнохв.



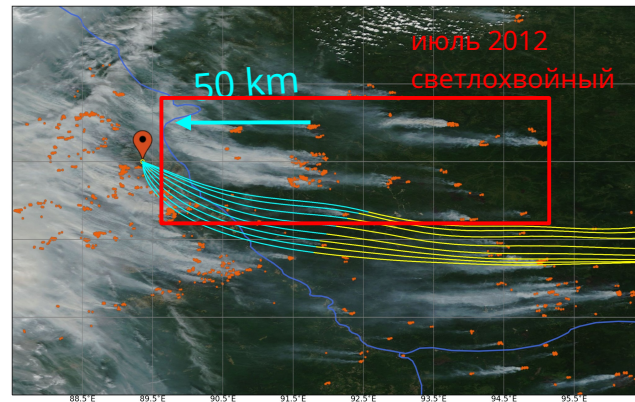
**F1:** 16–17 июня 2012, СЗ, темнохв.



**F2:** 21–27 июня 2012, ЮЗ, темнохв.?



**F3:** 22–26 июля 2012, В, светлохв.



→ Panov et al. (2018) сообщают о разной интенсивности горения в разных типах леса вокруг ZOTTO, но приводят средние за 2012 г эмиссионные коэффициенты для  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ .

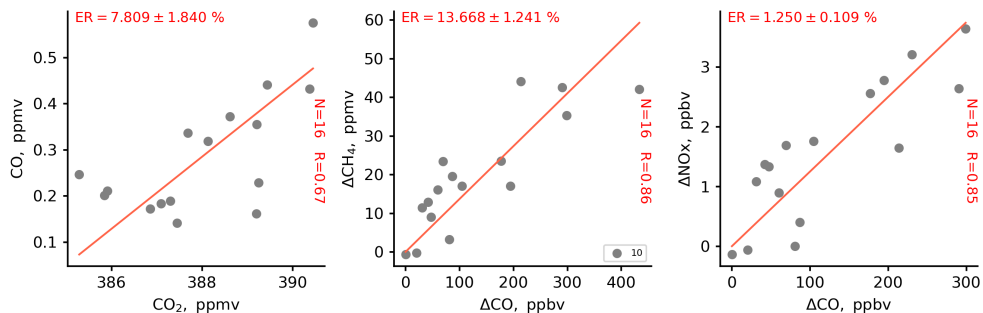
→ Мы связали шлейфы в ZOTTO с пожарами в **темно- и светлохвойных лесах** по спутниковым снимкам, обратным траекториям и данным Panov et al. (2018).

→ Отобрали эпизоды с **отдельными шлейфами**.

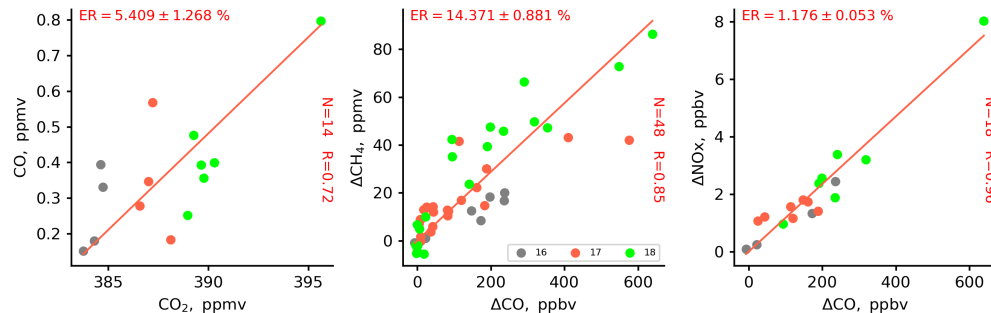
→ Карта MODIS GLCC не даёт нужной детализации. **Точное разделение возможно по картам древесных пород России (Барталев и др., 2016).**

## Экстремальные пожары в 2012 в ЗOTTO

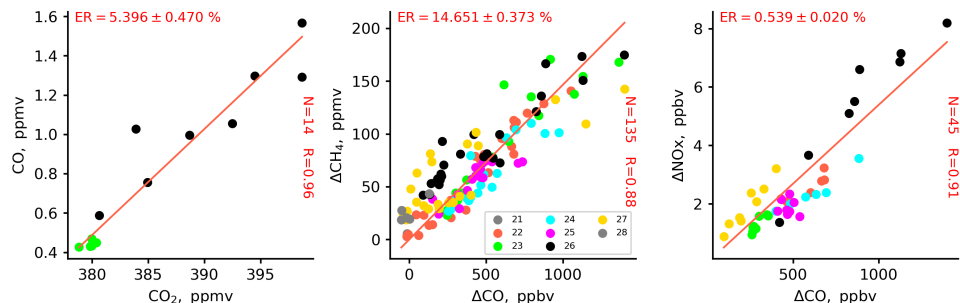
**F0:** 10 июня 2011, 3-ЮЗ, темнохв.



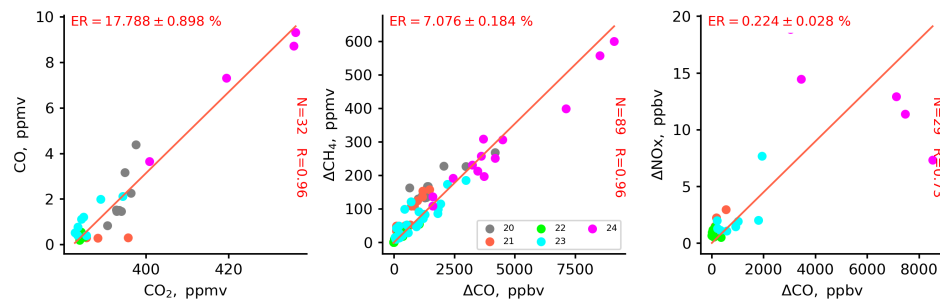
**F1:** 16–17 июня 2012, СЗ, темнохв.



**F2:** 21–27 июня 2012, ЮЗ, темнохв.?



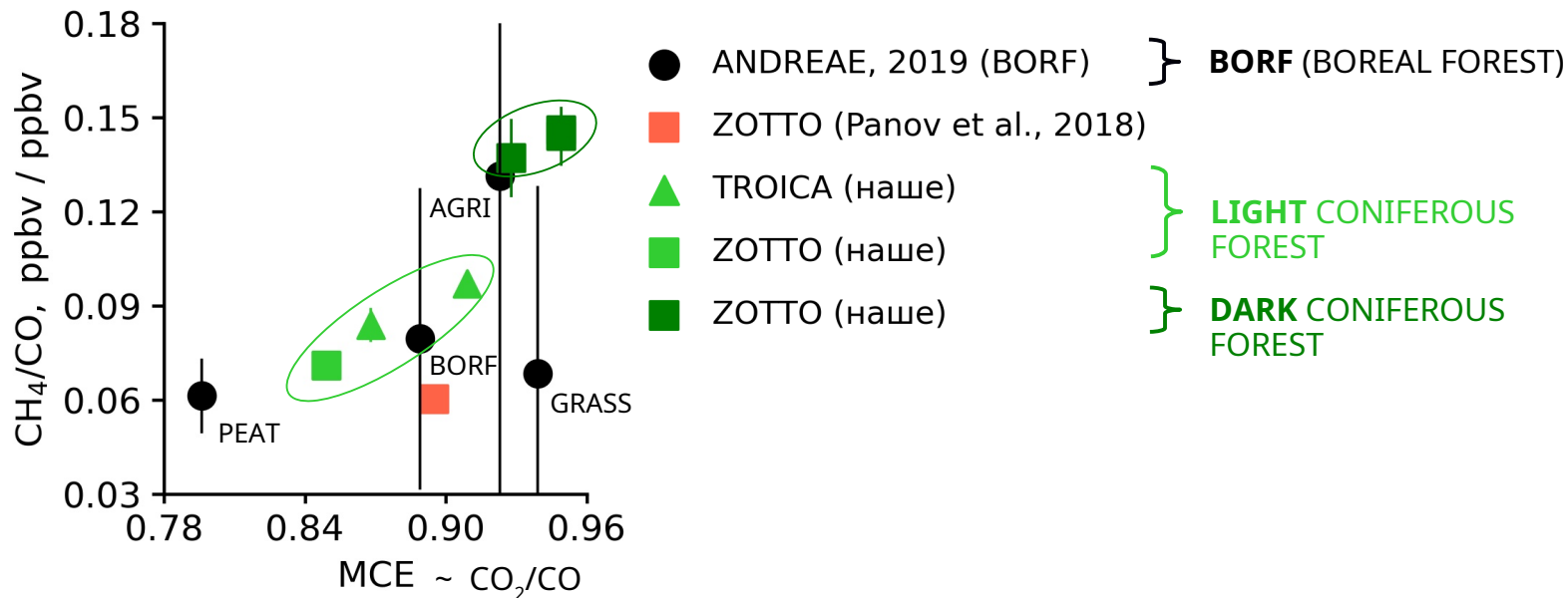
**F3:** 22–26 июля 2012, В, светлхв.



Высокие корреляции концентраций продуктов горения, даже в многодневных шлейфах (цвет – день), указывают на единый источник выбросов.



## Оценки $\text{CH}_4/\text{CO}$ в TROICA, ZOTTO и др.



→ Наши  $\text{CO}/\text{CO}_2_{\text{LIGHT}} = 0.14 \pm 0.04^*$  ( $\Delta + \blacksquare$ )  
 близки к  $\text{CO}/\text{CO}_2_{\text{BORF}} = 0.12 \pm 0.05^*$  ( $\bullet$ ) и в  
 два раза выше нашего  $\text{CO}/\text{CO}_2_{\text{DARK}} =$   
 $0.06 \pm 0.01^*$  ( $\blacksquare$ ).

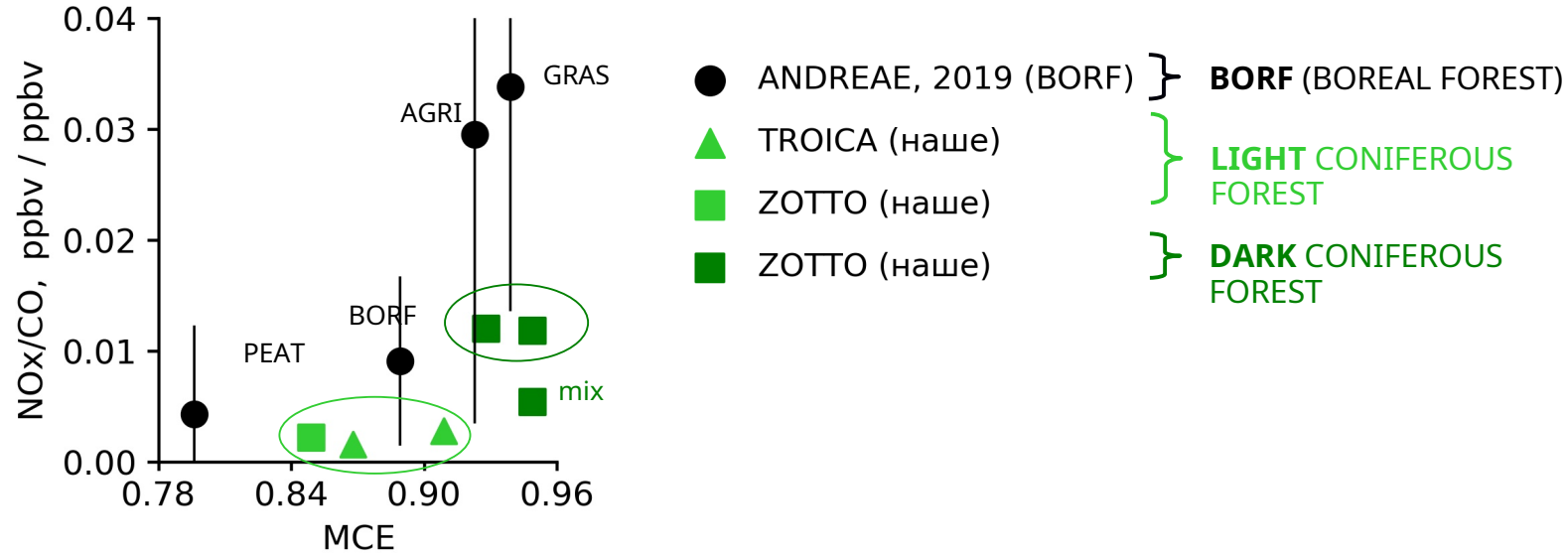
\*Размерность [ppbv / ppbv]

→ Наши  $\text{CH}_4/\text{CO}_{\text{LIGHT}} = 0.08 \pm 0.01^*$  ( $\Delta + \blacksquare$ )  
 близки к  $\text{CH}_4/\text{CO}_{\text{BORF}} = 0.08 \pm 0.05^*$  ( $\bullet$ ) и  
 $\text{CH}_4/\text{CO}_{\text{ZOTTO}} = 0.06^*$  у Panov et al. ( $\blacksquare$ ), но в  
 полтора раза ниже нашего  $\text{CH}_4/\text{CO}_{\text{DARK}} =$   
 $0.14 \pm 0.005^*$  ( $\Delta$ ).

→ Наши  $\text{ER}_{\text{CH}_4/\text{CO}}$  растут с MCE, хотя  $\text{CH}_4$  и  
 CO выделяются при тлении.

→ Наши  $\text{MCE}_{\text{DARK}} = 0.94 > \text{MCE}_{\text{LIGHT}} = 0.88$   
 согласуются с Panov et al. ( $\blacksquare$ ), где  
 показаны признаки (FRP,  
 повреждение растительности)  
 более интенсивных пожаров в  
 тёмнохвойных лесах рядом с ZOTTO.

## Оценки NOx/CO в TROICA, ZOTTO и др.



→ Наше  $\text{NOx/CO}_{\text{LIGHT}} = 0.002^*$  ( $\Delta + \blacksquare$ ) в 4 раза меньше  $\text{NOx/CO}_{\text{BORF}} = 0.009^*$  ( $\bullet$ ) и в 6 раз меньше нашего  $\text{NOx/CO}_{\text{DARK}} = 0.012^*$  ( $\blacksquare$ ). NOx/CO растёт с MCE.

\*Размерность [ppbv / ppbv]

→ Оценки NOx/CO различаются на порядок в разных исследованиях (Andreae, 2019).

→ Guo et al. (2020) получили очень низкие  $\text{NOx/CO} = 0.002^*$  и  $\text{MCE} = 0.68$  при сжигании в лаборатории биомассы из бореального леса на северо-востоке Китая.

→ Pirjola et al. (2015) получили очень высокие  $\text{NOx/CO} = 0.55^*$  и  $\text{MCE} = 0.97$  для экспериментального лесного пожара в Финляндии.

→ Нужно больше данных очень свежих шлейфов в разных экосистемах для оценки NOx/CO.

## Пропорции выбросов CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, BC, NO<sub>x</sub> в шлейфах пожаров светло- и темно-хвойных лесах отличаются в 1.5–6 раз

	CO/CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> /CO	NO <sub>x</sub> /CO x100	BC/CO x100	MCE
<b>Светлохвойные</b>					
TROICA	0.15 ± 0.07	0.08 ± 0.005	0.16 ± 0.03	0.50 ± 0.05	0.87
TROICA	0.10 ± 0.06	0.10 ± 0.002	0.28 ± 0.02	0.51 ± 0.11	0.91
ZOTTO*	0.18 ± 0.09	0.07 ± 0.002	0.22 ± 0.03	-	0.85
<b>Среднее</b>	<b>0.14 ± 0.07</b>	<b>0.08 ± 0.003</b>	<b>0.22 ± 0.03</b>	<b>0.50 ± 0.08</b>	<b>0.88</b>
<b>Темнохвойные</b>					
ZOTTO	0.08 ± 0.02	0.14 ± 0.01	1.20 ± 0.10	0.80	0.93
ZOTTO	0.05 ± 0.01	0.14 ± 0.01	1.18 ± 0.05	-	0.95
ZOTTO	0.05 ± 0.01	0.15 ± 0.01	0.54 ± 0.02	-	0.95
<b>Среднее</b>	<b>0.06 ± 0.01</b>	<b>0.14 ± 0.01</b>	<b>0.97 ± 0.07</b>	<b>0.80</b>	<b>0.94</b>
<b>Бореальный лес**</b>	<b>0.12 ± 0.05</b>	<b>0.08 ± 0.04</b>	<b>0.91 ± 0.75</b>	<b>0.36 ± 0.19</b>	<b>0.89</b>

\*Для BC/CO оценки из: Chi X. Long-term measurements of aerosol and carbon monoxide at the ZOTTO tall tower..., *Atm. Chem. Phys.*, 2013.

\*\*Метаанализ: Andreae M. O. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning – an updated assessment, *Atm. Chem. Phys.*, 2019.

**Хорошая новость: Y/X линейно растут с MCE.**

→ Оценки  $\text{CO}/\text{CO}_2$ ,  $\text{BC}/\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4/\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x/\text{CO}$  в шлейфах пожаров в светло- и темно-хвойных лесах отличаются в 1.5–6 раз, но линейно растут с  $\text{CO}_2/\text{CO}$ .

→ Использование **средних** коэффициентов эмиссий для **бореальных лесов** может давать **погрешности до 150–600%** в оценках эмиссий.

→ Уточнение пропорций выбросов продуктов горения в Сибирских пожарах позволит **повысить точность** суммарных оценок эмиссий, прогнозов качества воздуха в регионах, климатических прогнозов.

→ **Спутниковая карта древесных пород** позволит точнее разделить оценки соотношений выбросов продуктов горения по типам леса и установить закономерности.

### Спасибо за внимание! Наши публикации:



Vasileva et al., Emission ratios of trace gases and particles for Siberian forest fires..., Atm. Chem. Phys., 2017 (TROICA пожары)



Moiseenko et al., Regional impact of ozone precursor emissions on  $\text{NO}_x$  and  $\text{O}_3$  levels at ZOTTO..., Earth and Space Sci., 2021 (ZOTTO пока без пожаров)