

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



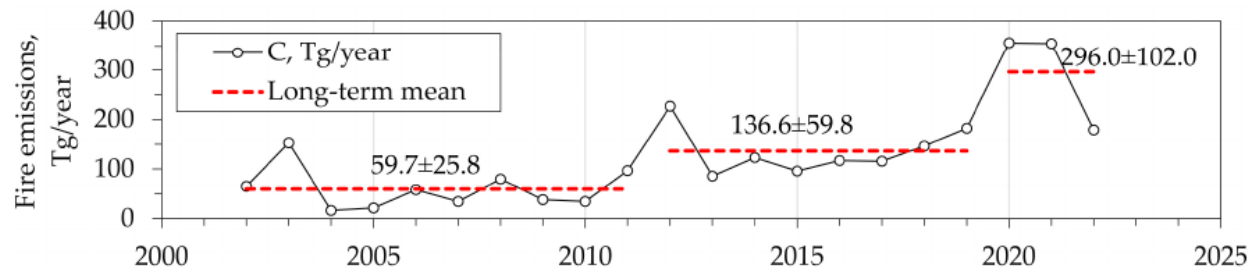
*Васильева А.В.¹, Моисеенко К. Б.¹, Скороход А.И.¹, Беликов И. Б.¹,
Панкратова Н.В.¹*

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

Москва, ИКИ, ноябрь 2024

av@ifaran.ru

Рост пожарной активности в Сибири



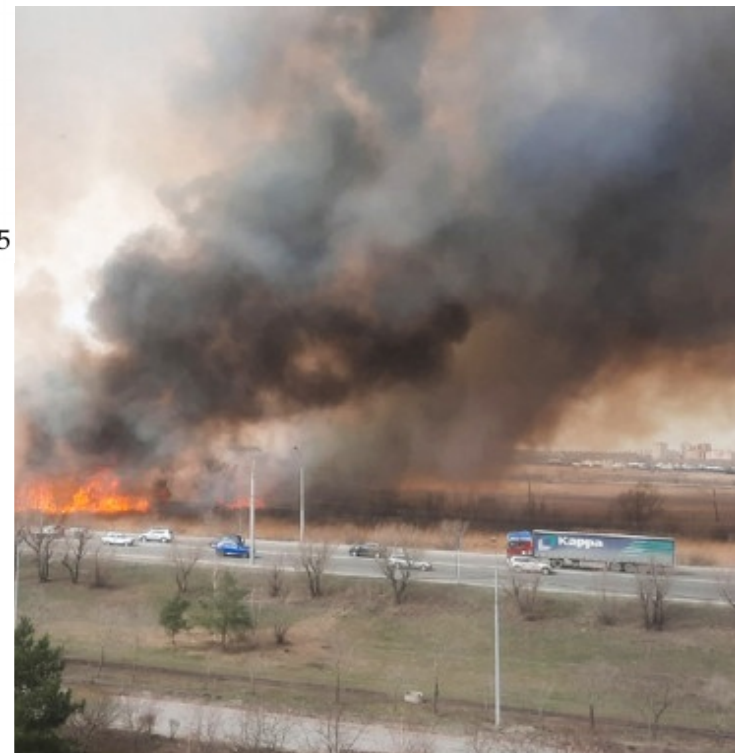
Fire 2023, 6(7), 246; <https://doi.org/10.3390/fire6070246>

Масса ежегодных выбросов углерода от природных пожаров в Сибири в 2002–2022 гг (по спутниковым данным о мощности теплового излучения). Источник: [Ponomarev et al. \(2023\)](#), 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](#)).

Kharuk V.I., Dvinskaya M.L., Im S.T., Golyukov A.S., Smith K.T. Wildfires in the Siberian Arctic. *Fire*. 2022.

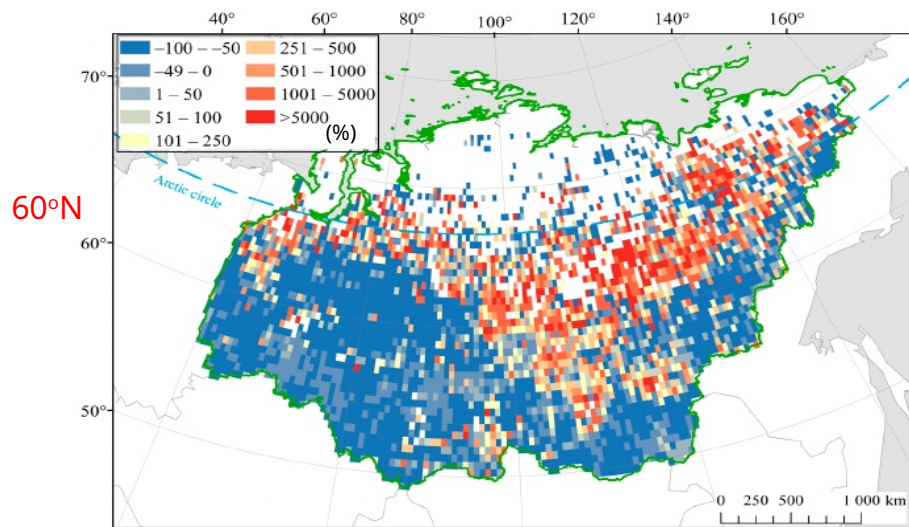
Ponomarev E.I., Zabrodin A.N., Shvetsov E.G., Ponomareva T.V. Wildfire Intensity and Fire Emissions in Siberia. *Fire*. 2023.



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, интенсивность пожаров, объёмы атмосферных выбросов (Ponomarev et al., 2023; Zhu et al., 2023).

→ 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).

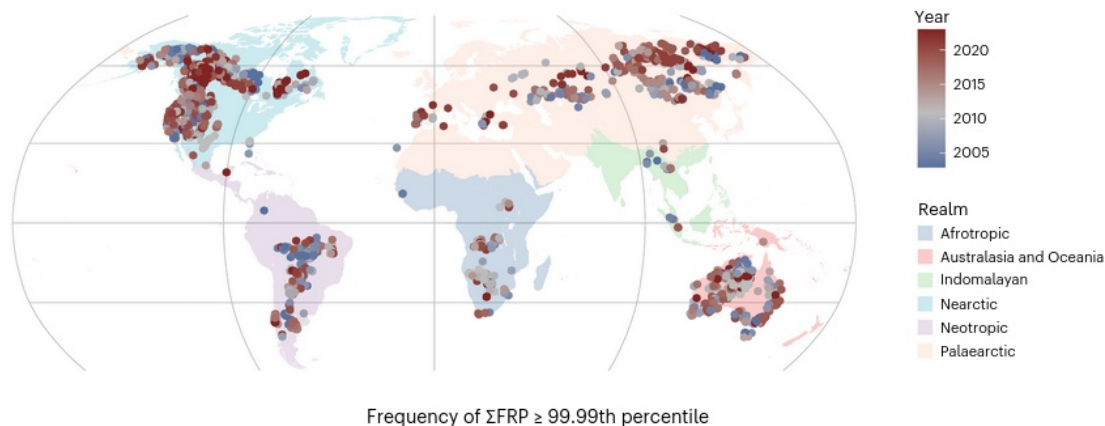
→ Сочетание новых наземных и спутниковых данных (продуктов) может снизить неопределённость в оценках эмиссий.

+ Cunningham et al. Increasing Frequency and Intensity of the Most Extreme Wildfires on Earth. *Nat. Ecol. Evolut. Brief Commun.* 2024.

+ Матвеев А.М., Барталев С.А. Сравнительный анализ оценок эмиссии углерода от природных пожаров на территории России на основании глобальных продуктов ДЗЗ. *Совр. Пробл. Дист. Зонд. Земли из Косм.* 2024.

+ Zhu X., Xu X., Jia G. Recent massive expansion of wildfire and its impact on active layer over pan-Arctic permafrost. *Env. Res. Lett.* 2023.

Бореальные пожары как глобальная угроза



Миграция экстремальных пожаров (верхние 0.01% суммарной 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 (CO₂, CH₄, 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).

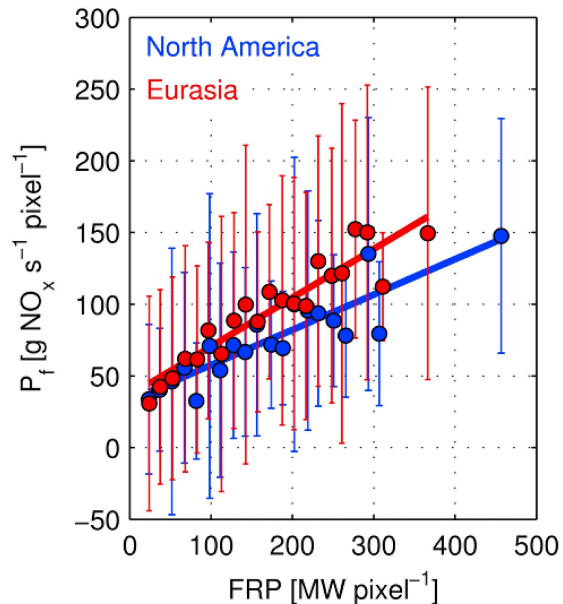


Fig. 2. View from the Zeppelin station (a) under clear conditions on 26 April, and (b) during the smoke episode on 2 May 2006. Image courtesy of Ann-Christine Engvall.

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

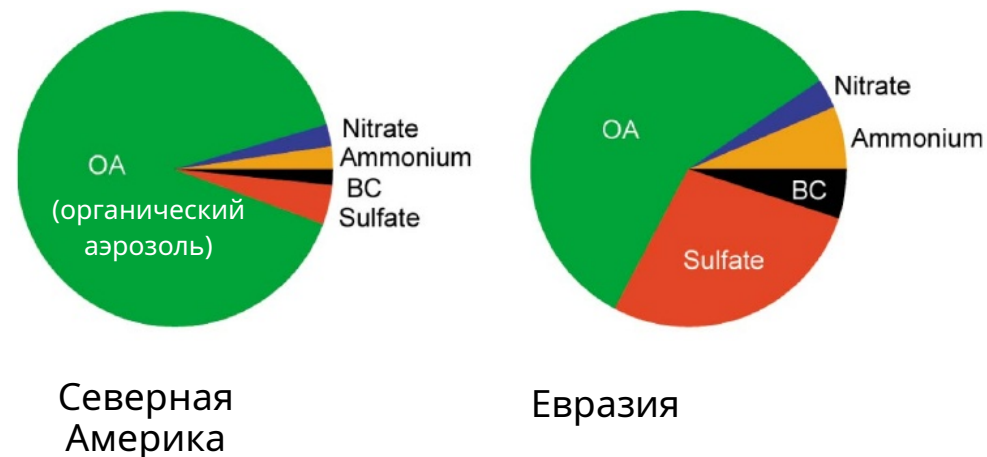
Малые газы (NO_x)



Средняя интенсивность выбросов NO_x от пожаров в бореальных лесах Евразии и Северной Америки

Авторы: Dr. Stefan Schreier et al. Differences in Satellite-Derived NO_x Emission Factors Between Eurasian and North American Boreal Forest Fires. *Atm. Env.*, 2015

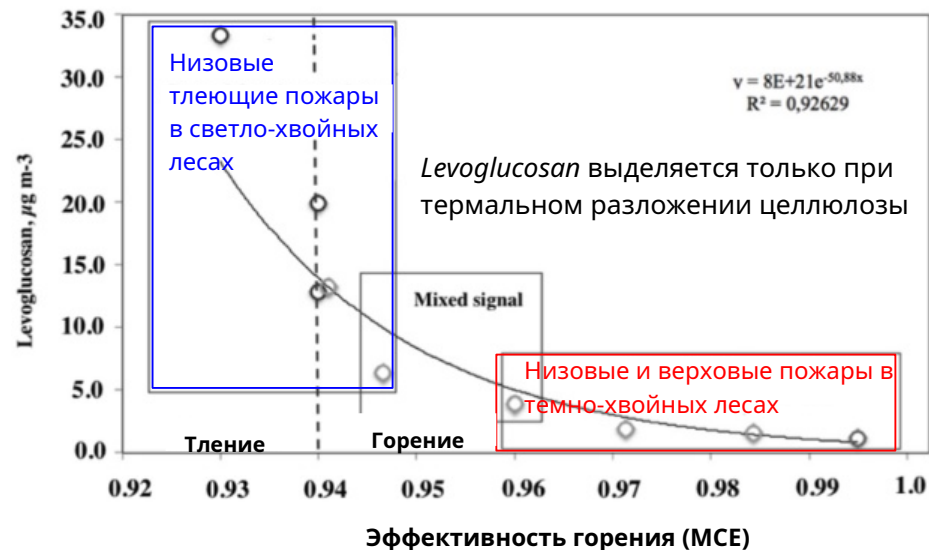
Аэрозоли



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



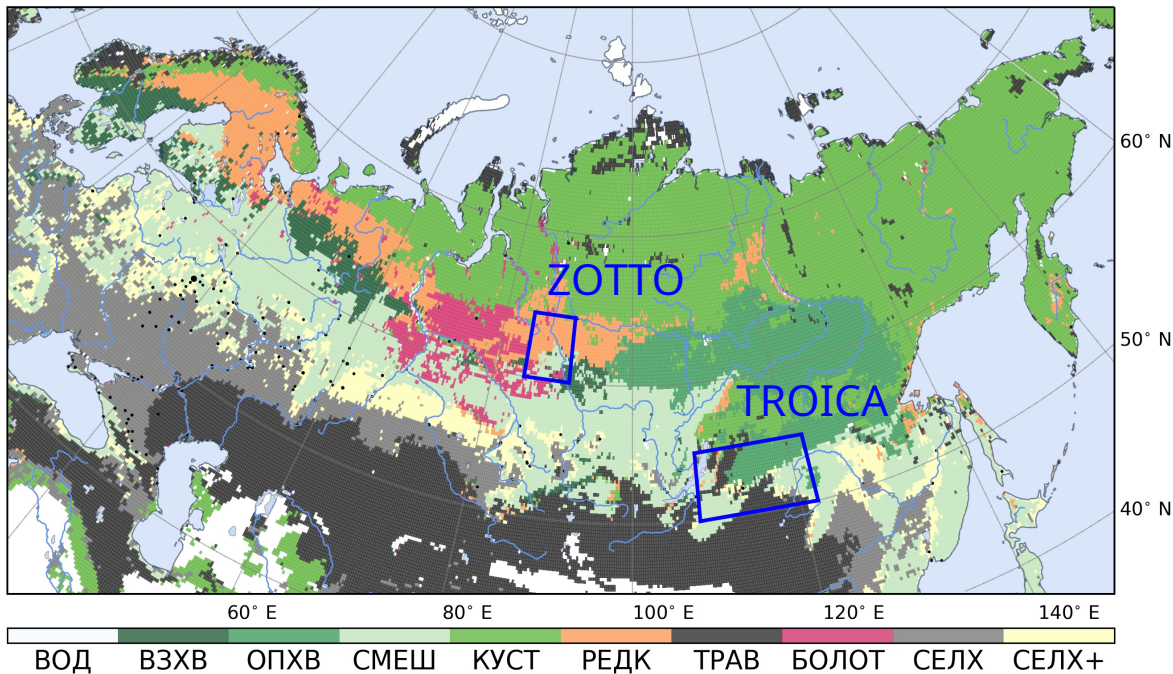
Авторы: Panov et al. (2016), Институт Леса, Красноярск
Пожары в *темно-* и *светло-* хвойных лесах в 15–20 км от ZOTTO горят с разной интенсивностью и выбросом органики в разных пропорциях.

Авторы приводят средние коэффициенты эмиссий.

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

Panov A.V., Prokushkin A.S., Korets M.A., et al. Linking trace gas measurements and molecular tracers of organic matter in aerosols for identification of ecosystem sources and types of wildfires in Central Siberia. *IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci.* 2016.

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: CO₂, CO, CH₄, NO_x, O₃

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

Ж/д экспедиции TROICA

Измерения: CO₂, CO, CH₄, BC,
NO_x, O₃

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);

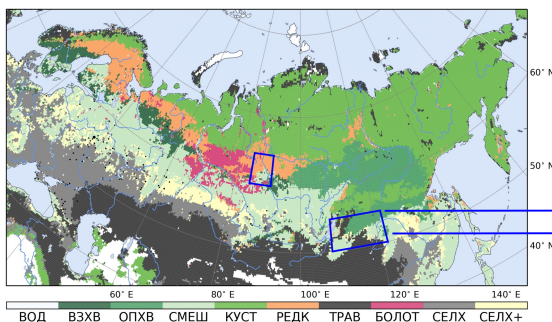
→ позволяет **сравнить оценки $ER_{Y/X}$ в разных исследованиях** ввиду высокой корреляции между $ER_{Y/X}$ и MCE (Ward & Hardy, 1991).



Фронт низового пожара с очагами открытого горения.

Фото: ГУ МЧС по Новосибирской области / rbc.ru

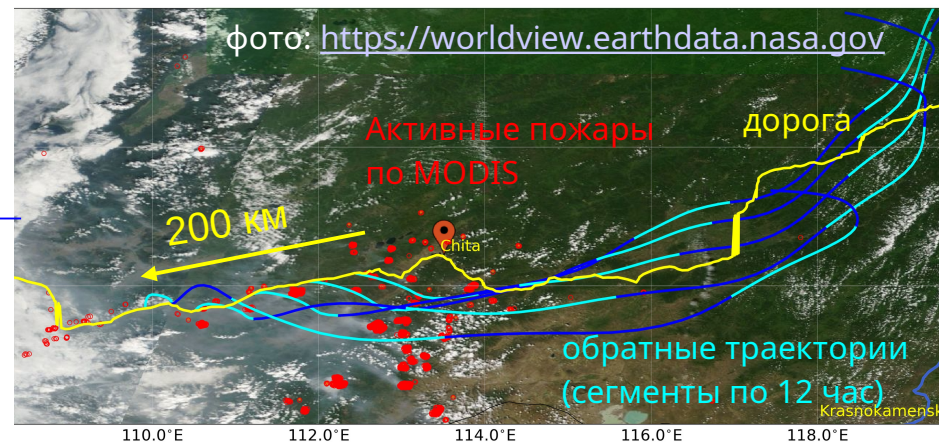
TROICA: светлохойный лес



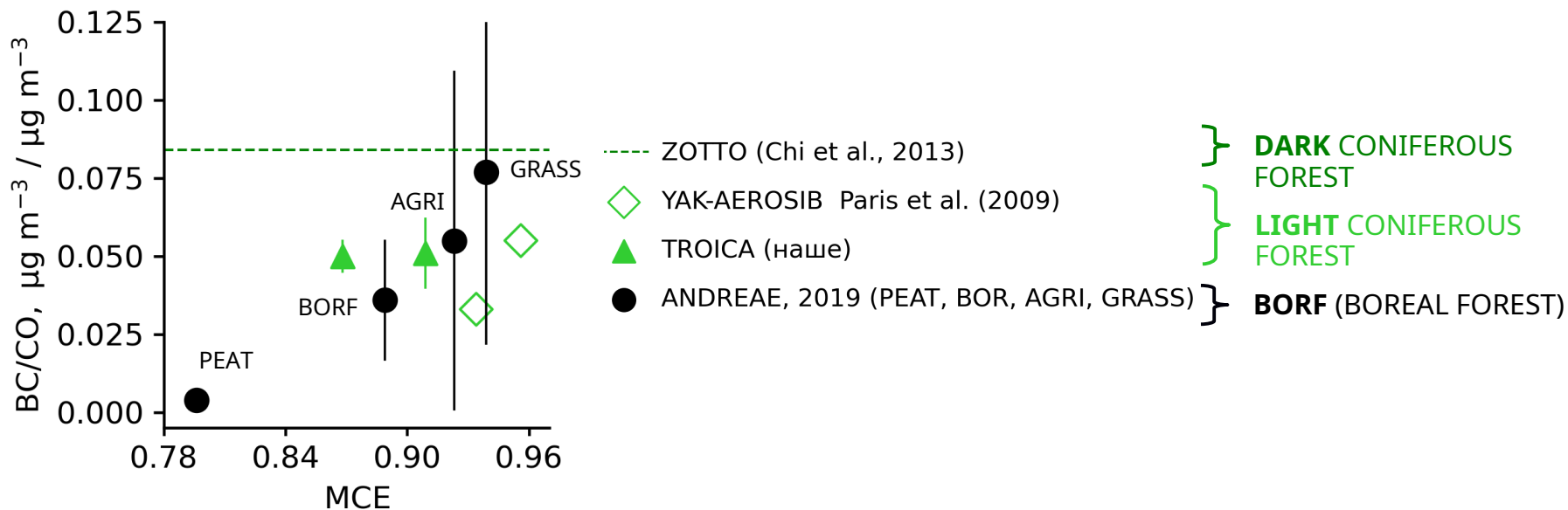
→ Положение точек активных пожаров MODIS вблизи ж/д соответствует участкам с наивысшими концентрациями продуктов горения в воздухе и высоким корреляциям между ними.

→ 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)

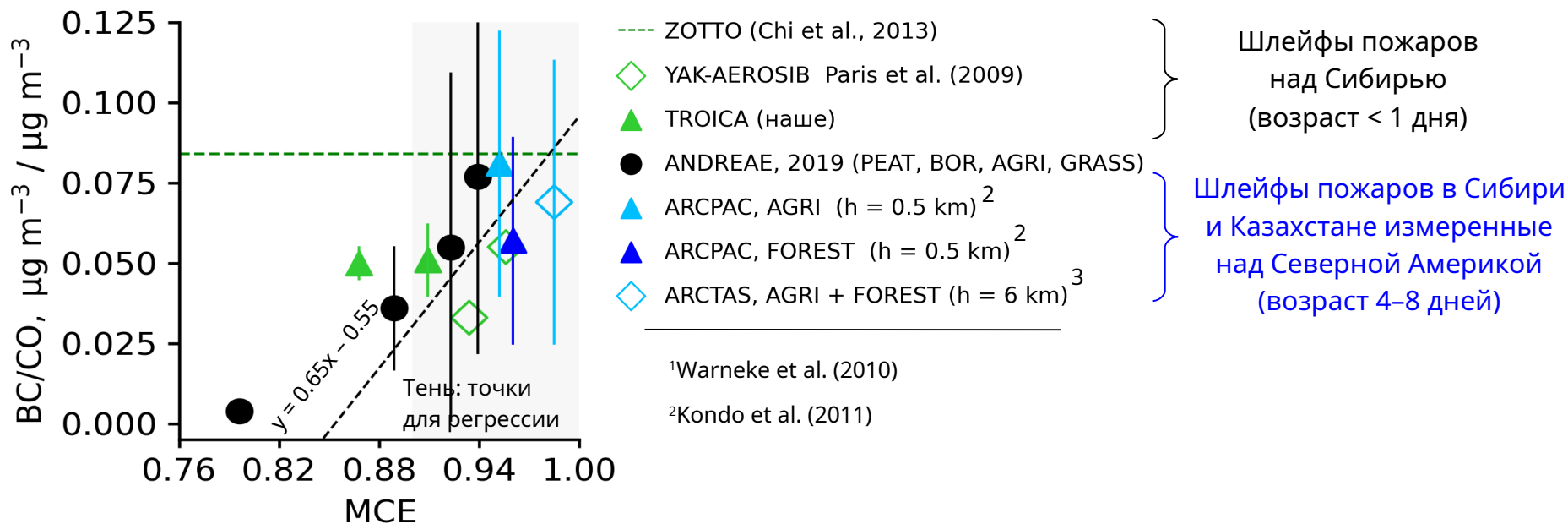


→ Среднее $BC/CO_{BORF,ANDREA}$ (●) в 1.5 раза ниже нашего $BC/CO_{LIGHT,TROICA}$ (▲) и $BC/CO_{LIGHT,YAK-AEROSIB}$ (◇) по самолётным наблюдениям в Якутии в июле 2008 (Paris et al., 2009).

→ 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⁻³ / мкг м⁻³]

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.

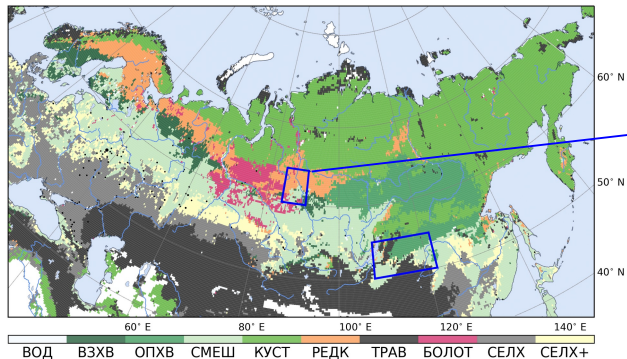
→ Sahu et al. (2012) сообщают о линейной зависимости между BC/CO и MCE для шлейфов лесных и с/х пожаров в Калифорнии летом 2008.

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

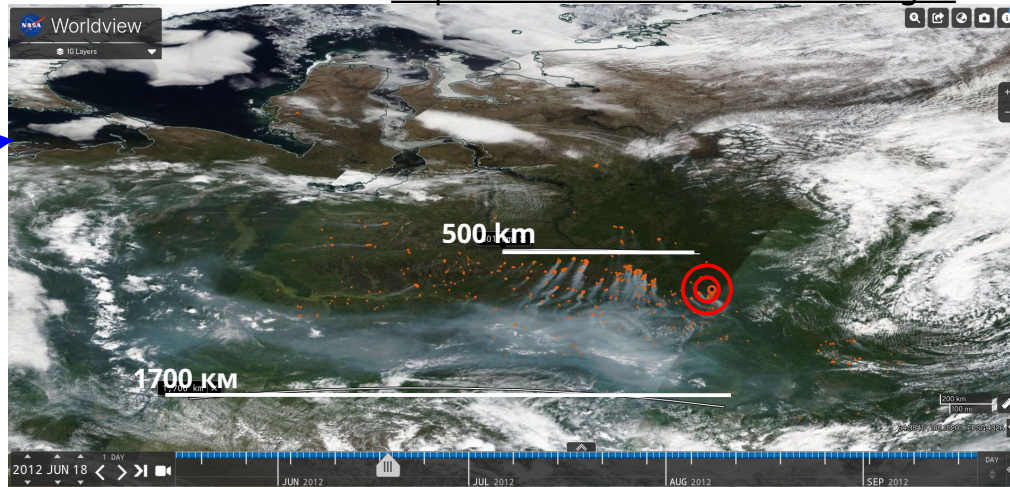


Vasileva et al., Emission ratios of trace gases and particles for Siberian forest fires..., *Atm. Chem. Phys.*, 2017

ZOTTO: светло- и темно-хвойный лес



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

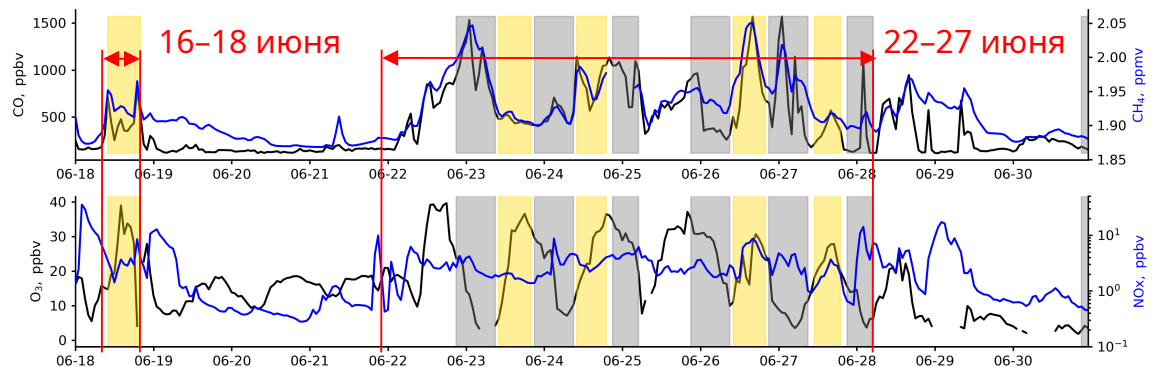


→ Июнь–июль 2012: аномальная жара, засуха, сухие грозы.

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

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

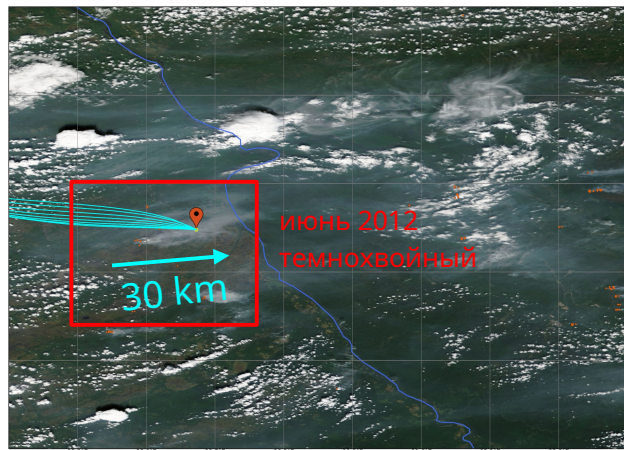
→ Ближайшие пожары в 15–450 км от ZOTTO, есть эпизоды регистрации отдельных шлейфов или группы шлейфов при подходящем ветре.



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

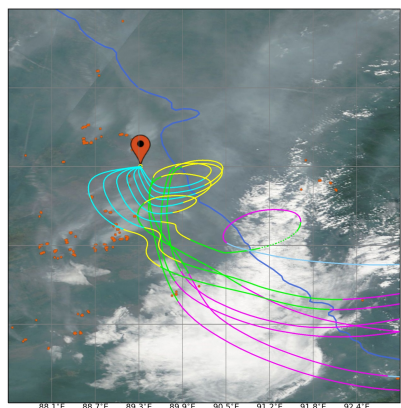
F0: 10 июня 2011, 3-ЮЗ, темнохв.



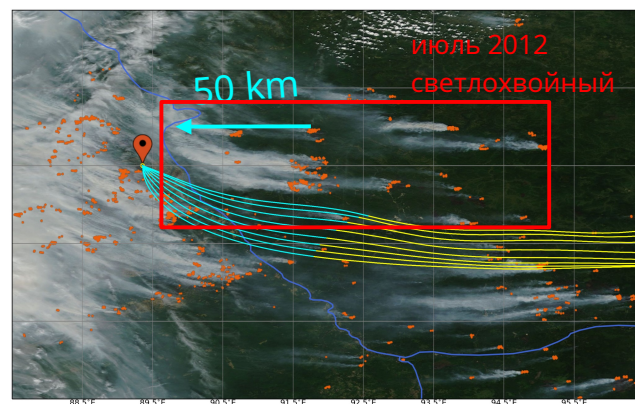
F1: 16–17 июня 2012, СЗ, темнохв.



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 в 2012 г, но приводят средние эмиссионные коэффициенты для CO_2 , CO , CH_4 .

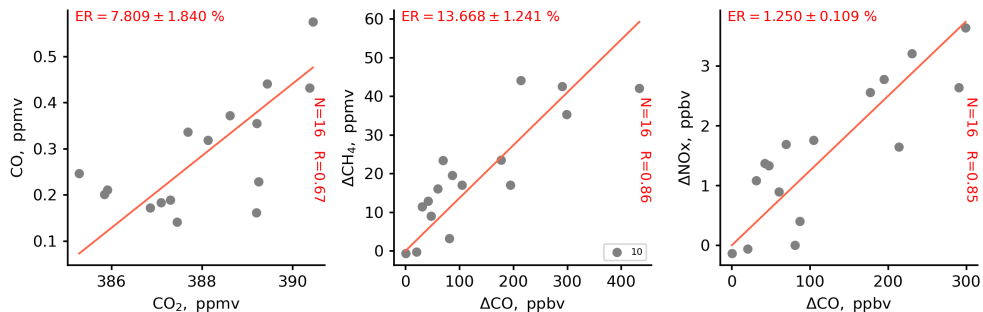
→ Отобрали эпизоды с **отдельными** шлейфами в ZOTTO.

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

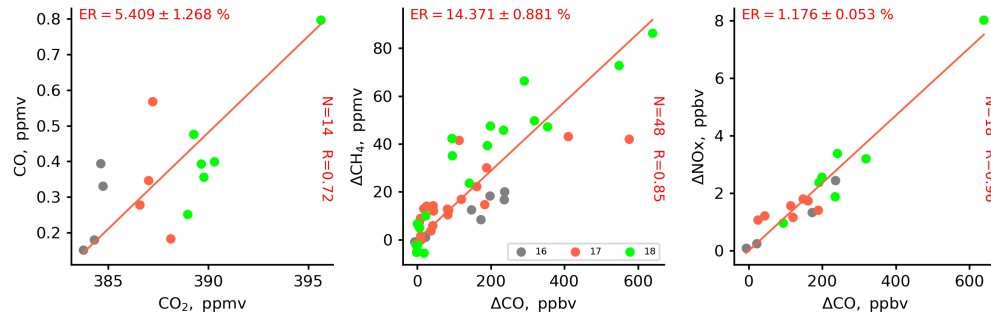
→ Карта MODIS GLC не даёт нужной детализации. Точное разделение возможно по **картам древесных пород России** (Барталев и др., 2016).

Экстремальные пожары в 2012 в ЗOTTO

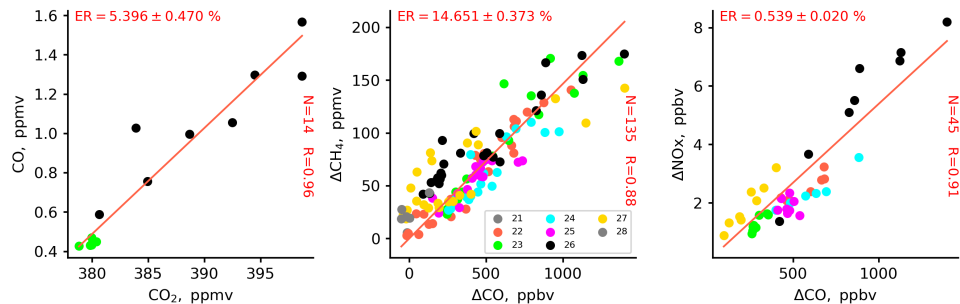
F0: 10 июня 2011, 3-ЮЗ, темнохв.



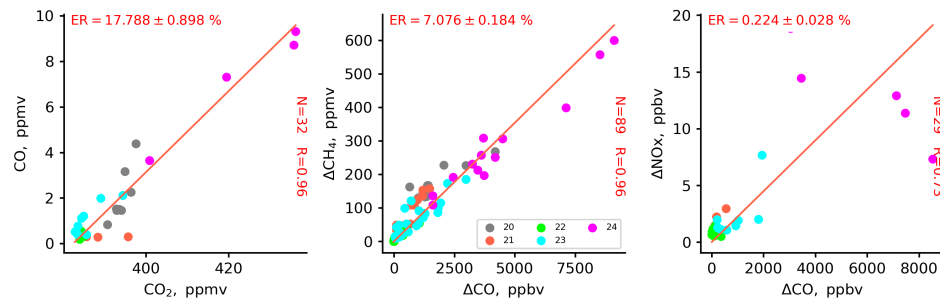
F1: 16–17 июня 2012, СЗ, темнохв.



F2: 21–27 июня 2012, ЮЗ, темнохв.?

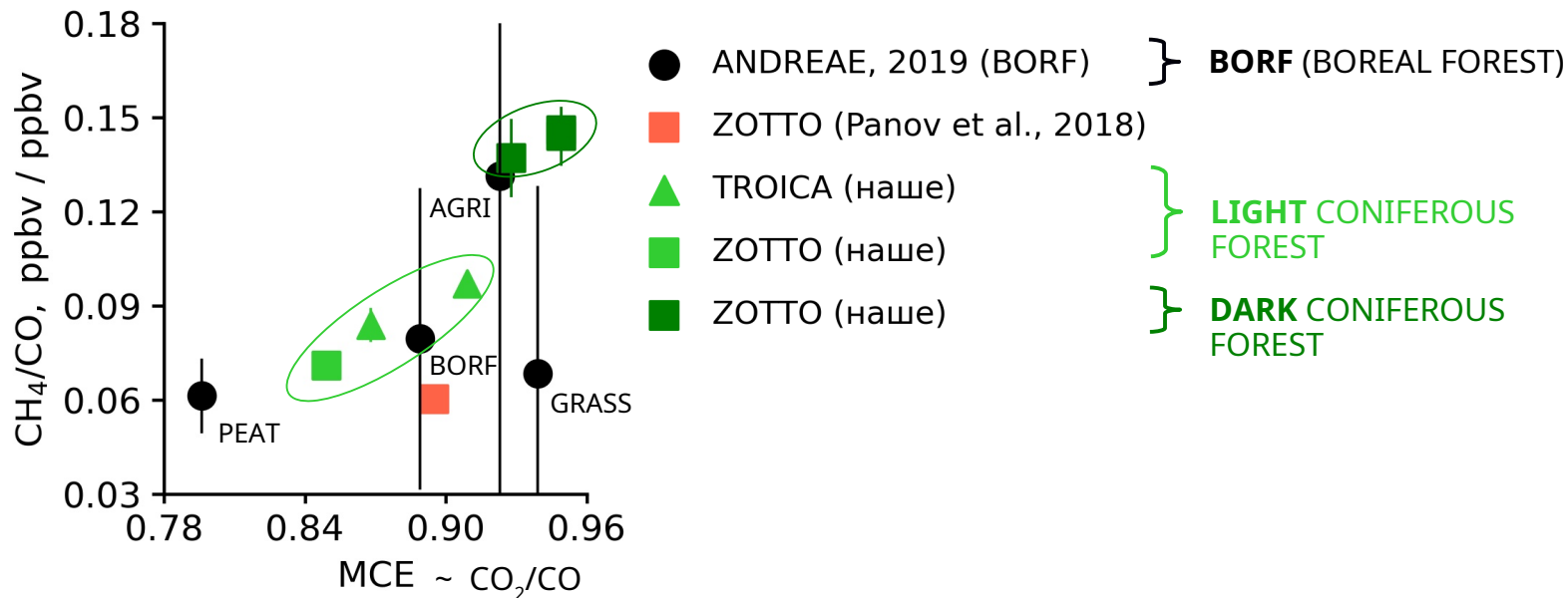


F3: 22–26 июля 2012, В, светлхв.



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

Оценки CH_4/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).

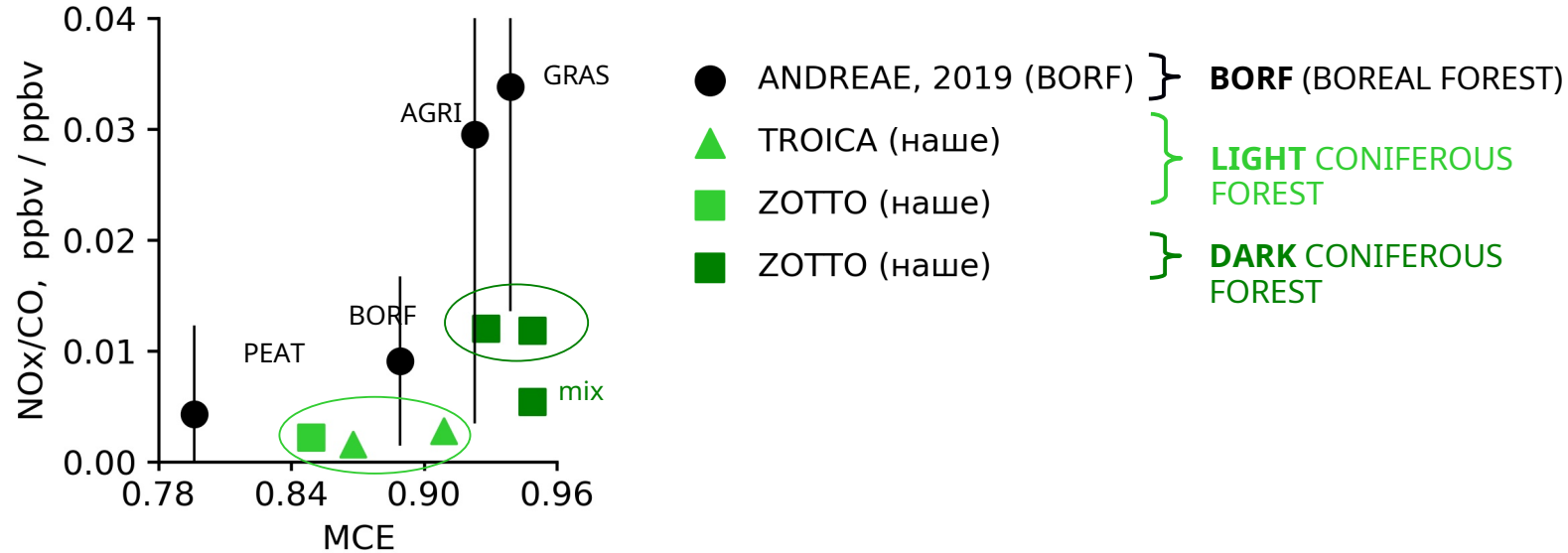
*Размерность [ppbv / ppbv]

→ 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 $\text{CH}_4/\text{CO}_{\text{DARK}} =$
 $0.14 \pm 0.005^*$ (Δ).

→ Наши $\text{ER}_{\text{CH}_4/\text{CO}}$ растут с MCE, хотя 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 CH_4/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 CO₂, CO, CH₄, BC, NO_x в шлейфах пожаров светло- и темно-хвойных лесах отличаются в 1.5–6 раз

	CO/CO ₂	CH ₄ /CO	NO _x /CO x100	BC/CO x100	MCE
Светлохвойные					
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
Среднее	0.14 ± 0.07	0.08 ± 0.003	0.22 ± 0.03	0.50 ± 0.08	0.88
Темнохвойные					
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
Среднее	0.06 ± 0.01	0.14 ± 0.01	0.97 ± 0.07	0.80	0.94
Бореальный лес**	0.12 ± 0.05	0.08 ± 0.04	0.91 ± 0.75	0.36 ± 0.19	0.89

*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 CO/CO_2 , BC/CO , CH_4/CO , NO_x/CO в шлейфах пожаров в светло- и темно-хвойных лесах отличаются в 1.5–6 раз, но линейно растут с CO_2/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 NO_x and O_3 levels at ZOTTO..., Earth and Space Sci., 2021 (ZOTTO пока без пожаров)