

Анализ точности балансовой методики расчета выбросов климатически активных газов по данным регулярного спутникового мониторинга

Ермаков Д.М.^{1,2}, Пашинов Е.В.¹, Лозин Д.В.¹, Лупян Е.А.¹

¹ИКИ РАН

²ФирЭ РАН

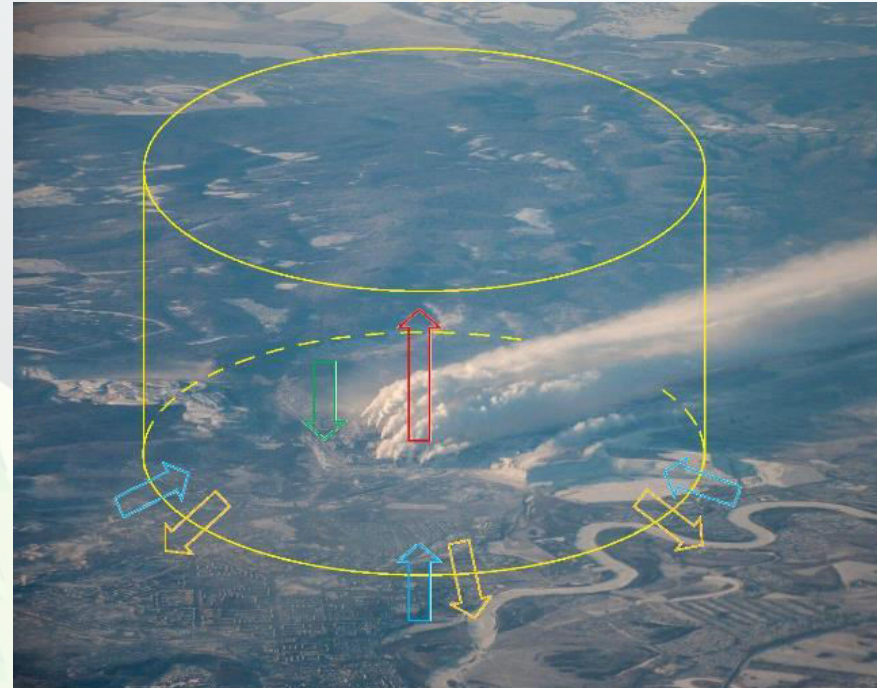
Методика балансовых расчётов

(Под «балансом парниковых газов» (ПГ) понимается разность между суммарным выбросом газа в пределах данной территории и его суммарным стоком на той же территории)

Рассматривается подход к расчету баланса ПГ, основанный на вычислительной схеме, замкнутой относительно данных спутниковых измерений концентраций ПГ

Приближения:

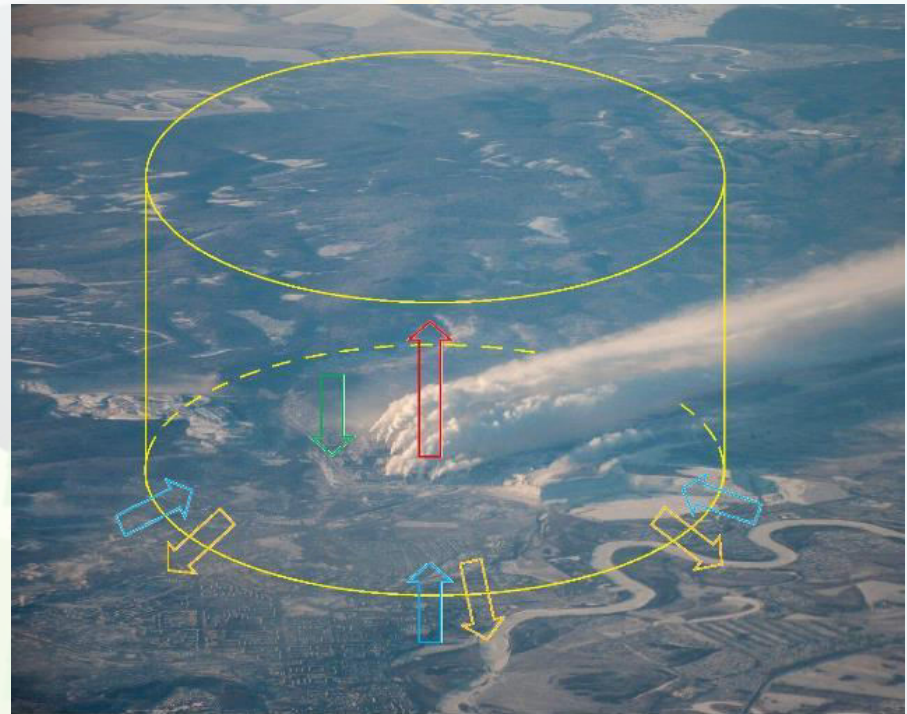
- Влияние химических реакций с участием рассматриваемого ПГ на его концентрацию в атмосфере пренебрежимо мало на выбранном интервале наблюдений.
- В этом случае из закона сохранения вещества следует, что изменение содержания ПГ в замкнутом объеме атмосферы возможно только за счет его притока (оттока) через граничную поверхность этого объема



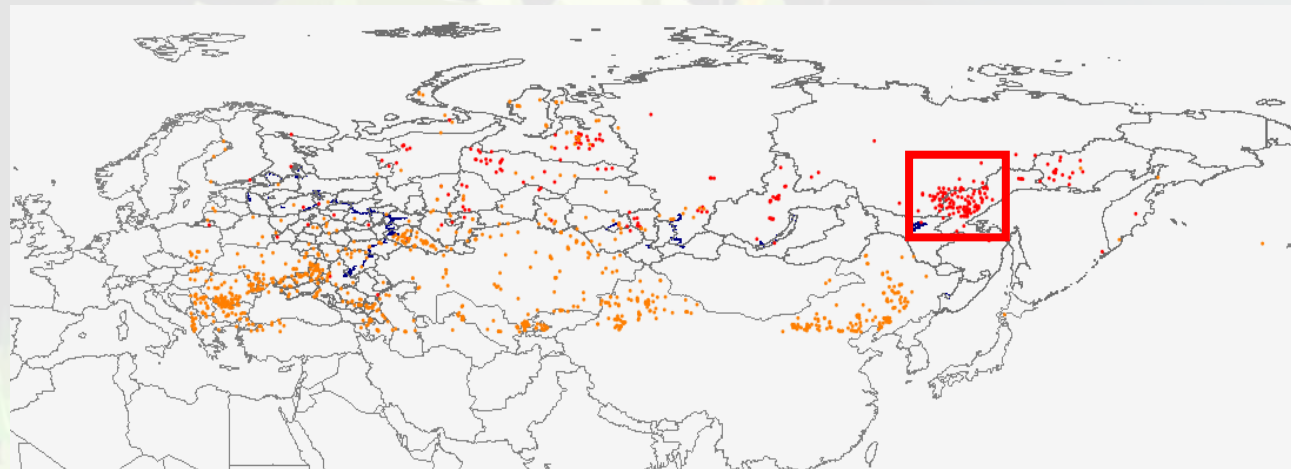
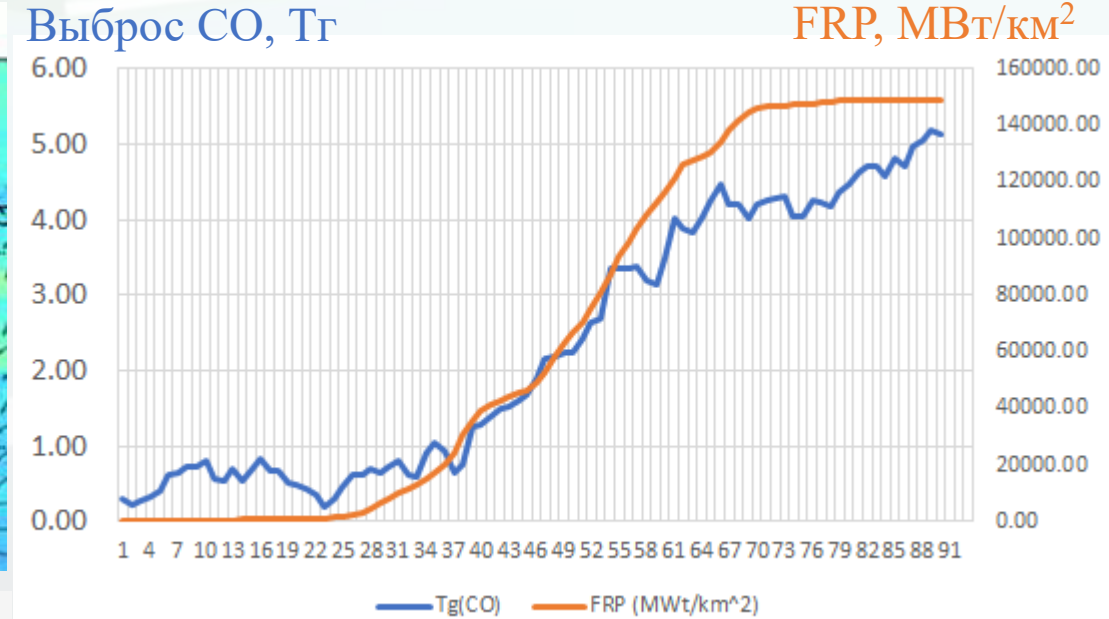
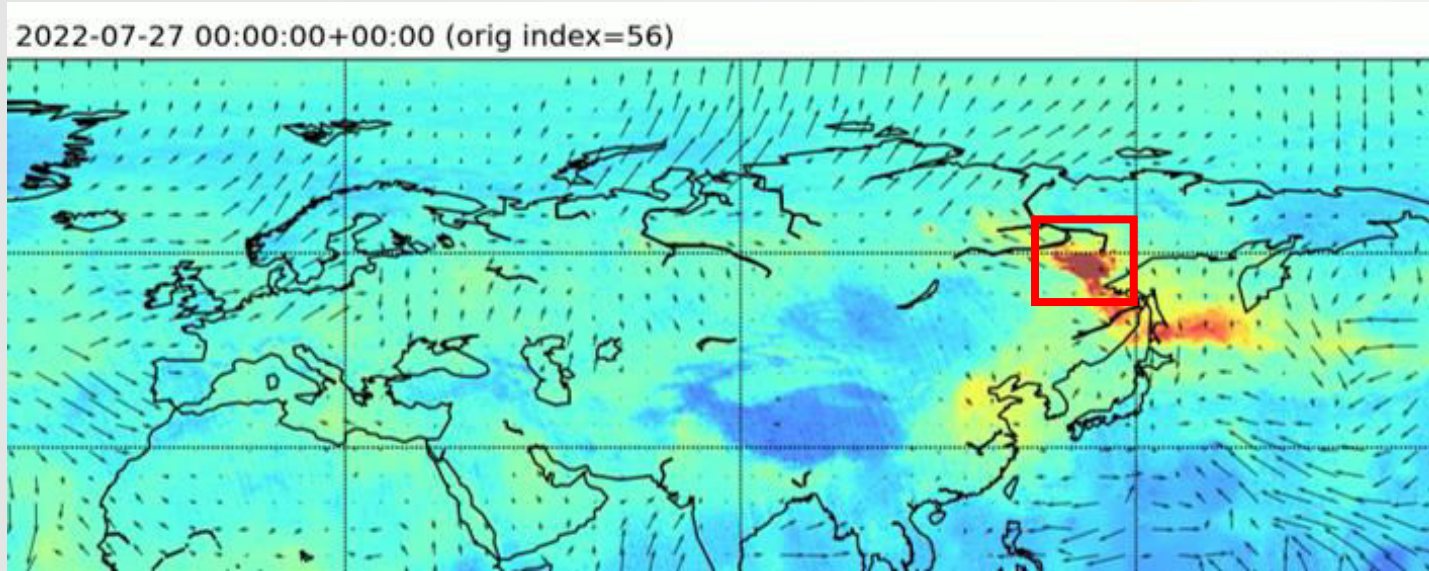
Методика балансовых расчётов

$$\int_{t_{min}}^{t_{max}} B(t)dt = - \iint_A M(x,y)dx dy \Big|_{t_{min}}^{t_{max}} - \int_{t_{min}}^{t_{max}} dt \oint_L F(x,y)dn$$
$$F(x,y) = \int_0^{+\infty} \rho(x,y,z)v(x,y,z)dz = M(x,y)v^*(x,y)$$

где t_{min} и t_{max} – начало и конец интервала наблюдений; $B(t)$ – «мгновенный» баланс ПГ для заданной территории A ; $M(x,y)$ – массовое содержание ПГ в вертикальном атмосферном столбе в $кг \cdot м^{-2}$; F – интегральный по высоте атмосферы горизонтальный поток ПГ в $кг \cdot м^{-1} \cdot с^{-1}$. v^* – эффективная (взвешенная по высоте атмосферы) скорость горизонтального переноса ПГ в $м \cdot с^{-1}$.



Восстановление баланса CO (выброса) в области сильных лесных пожаров



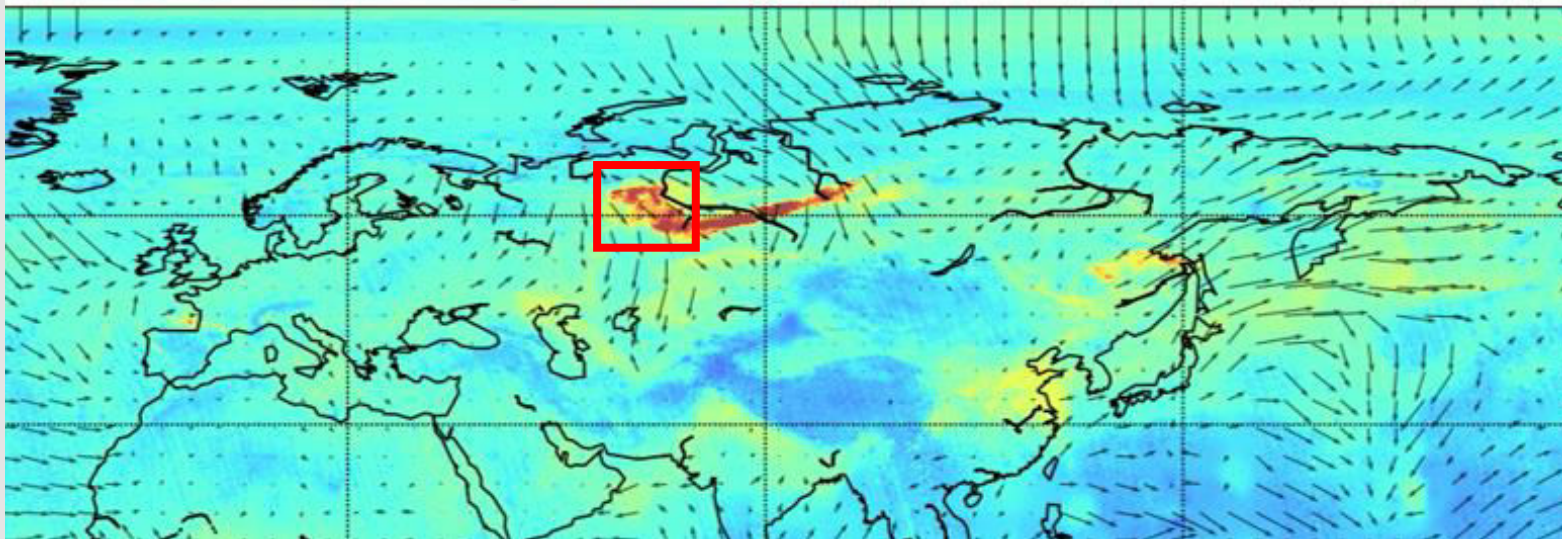
Скопление очагов лесных пожаров летом 2022 года на севере Хабаровского края и юго-востоке республики Саха

За интервал с 01.06.22 по 31.08.22:
накопленный выброс CO (балансовая оценка)
накопленная интенсивность горения FRP

Выброс CO в интервале с 10.07.22 по 10.08.22:
по GFED совокупно – $3,9 \times 10^9$ кг;
по балансовой оценке – $2,9 \times 10^9$ кг;
по GFED (без типизации) – $1,4 \times 10^9$ кг.

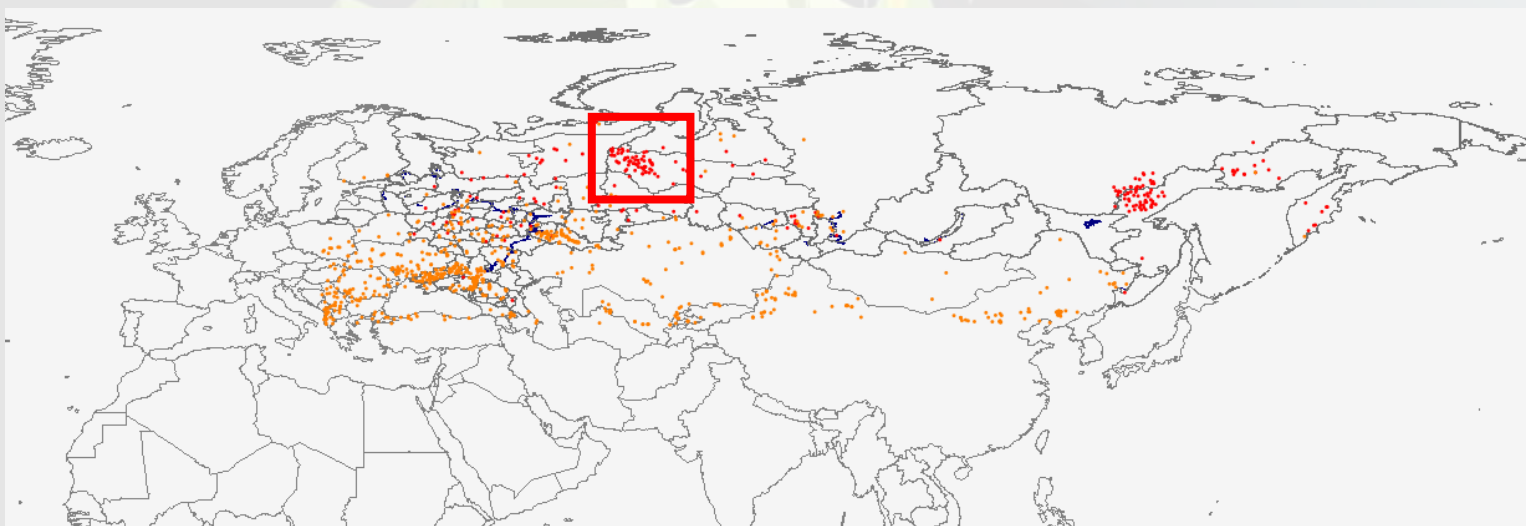
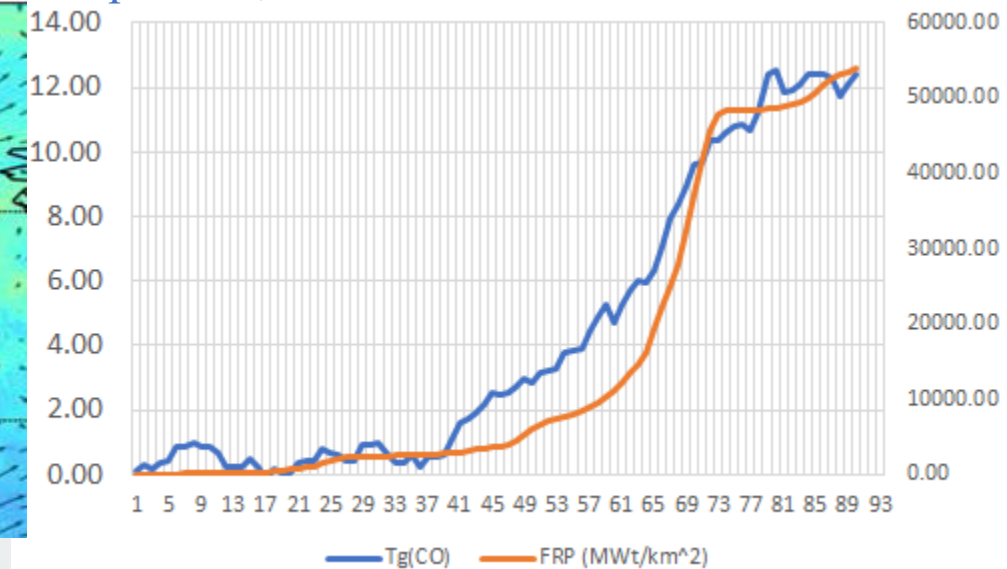
Восстановление баланса CO (выброса) в области сильных лесных пожаров

2022-08-10 00:00:00+00:00 (orig index=70)



Выброс CO, Tг

FRP, МВт/км²



За интервал с 01.06.22 по 31.08.22:
накопленный выброс CO (оценка баланса)
накопленная интенсивность горения FRP

Выброс CO с 20.07.22 по 27.08.22:
по GFED совокупно – $2,42 \times 10^9$ кг;
по балансовой оценке – $2,42 \times 10^9$ кг.

Скопление очагов лесных пожаров летом 2022 года на территории западной части Ханты-Мансийского автономного округа

Анализ погрешностей вычисления баланса

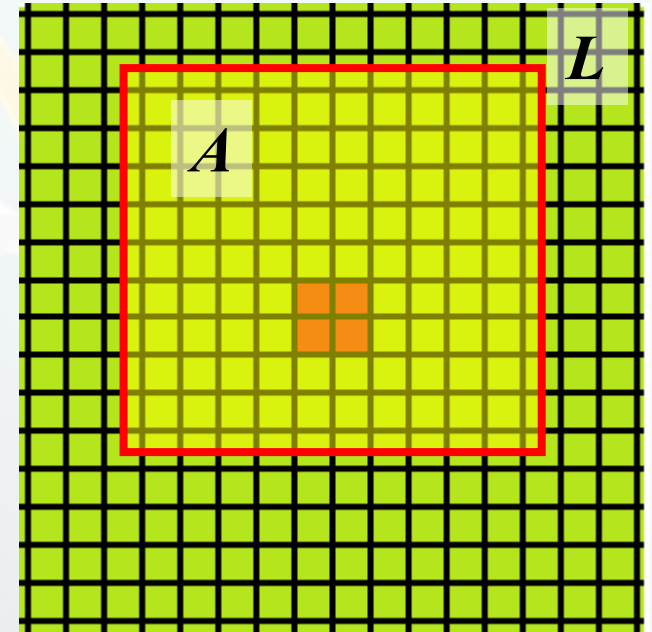
1. Разностная схема

$$B_L(t_s, t_e) = I_L(t_s) - I_L(t_e) + C_L(t_s, t_e)$$

$I_L(t_s), I_L(t_e)$ – общее содержание газовой компоненты (в кг) внутри контура L в начальный, t_s , и конечный, t_e , моменты времени, соответственно;

$C_L(t_s, t_e)$ – горизонтальный перенос газовой компоненты (в кг) внутрь контура L за отрезок времени $[t_s, t_e]$.

Ошибка вычисления баланса $\Delta B_L(t_s, t_e)$ определяется ошибками $\Delta I_L(t_s), \Delta I_L(t_e), \Delta C_L(t_s, t_e)$.



Анализ погрешностей вычисления баланса

2. Дисперсии ошибок

$$\sqrt{D(\Delta B_L(t_s, t_e))} = \sqrt{D(\Delta I_L(t_s)) + D(\Delta I_L(t_e)) + D(\Delta C_L(t_s, t_e))}$$

$$D(\Delta I_L(t_s)) = D(\Delta I_L(t_e)) = N_A D_I$$

N_A – число узлов расчетной сетки, относящихся к области A , охваченной границей L .

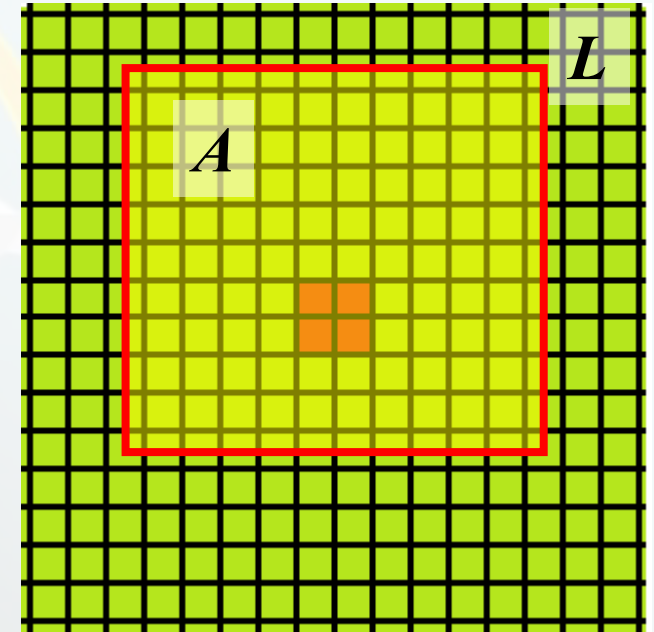
Предположения:

$$D(\Delta C_L(t_s, t_e)) = N_L D_C$$

N_L – число узлов расчетной сетки, формирующих границу L .

$$D(\Delta C_L(t_s, t_e)) \gg 2N_A D_I$$

D_C – «удельная» дисперсия ошибки расчета горизонтального переноса вещества через элемент границы



Анализ погрешностей вычисления баланса

3. Сценарий формирования выброса

Интенсивное локализованное стабильное горение

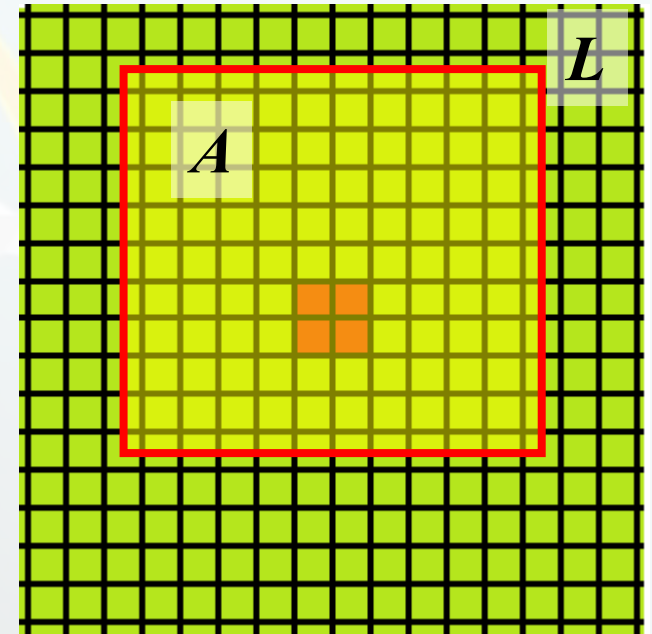
$$B_L(t_s, t_e) \geq I_L(t_s) - I_L(t_e); B_L(t_s, t_e) \cong C_L(t_s, t_e)$$

$$\Delta B_L(t_s, t_e) = \Delta I_L(t_s) + \Delta I_L(t_e) + \Delta C_L(t_s, t_e)$$

$$\frac{\Delta B_L(t_s, t_e)}{B_L(t_s, t_e)} = \frac{\Delta I_L(t_s) + \Delta I_L(t_e)}{B_L(t_s, t_e)} + \frac{\Delta C_L(t_s, t_e)}{B_L(t_s, t_e)}$$

$$D \left(\frac{\Delta I_L(t_s) + \Delta I_L(t_e)}{B_L(t_s, t_e)} \right) \leq D \left(\frac{\Delta I_L(t_s) + \Delta I_L(t_e)}{I_L(t_s) - I_L(t_e)} \right) \sim \frac{1}{N_A} \sim \frac{1}{N_L^2}$$

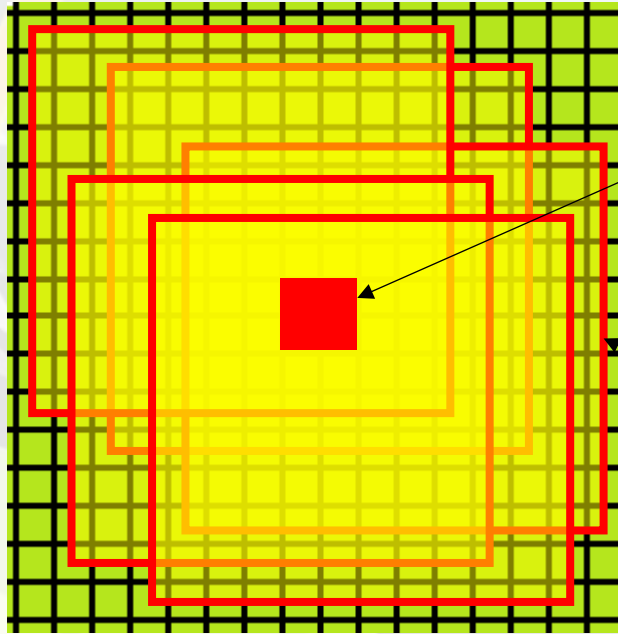
$$D \left(\frac{\Delta C_L(t_s, t_e)}{B_L(t_s, t_e)} \right) \cong D \left(\frac{\Delta C_L(t_s, t_e)}{C_L(t_s, t_e)} \right) \sim \frac{1}{N_L}$$



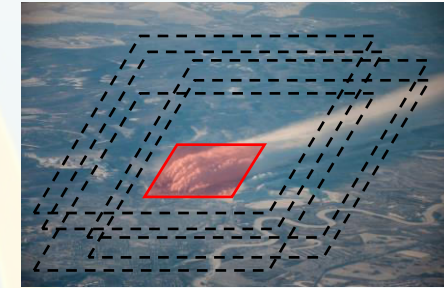
$$\sqrt{D \left(\frac{\Delta B_L(t_s, t_e)}{B_L(t_s, t_e)} \right)} \sim \frac{1}{\sqrt{N_L}}$$

Методика оценки погрешности

По каждой из границ размера N_L проводится расчет баланса B_L^i .
Рассчитывается выборочное среднее B_L и выборочное СКО σ_L .
Вычисляется оценка относительной погрешности расчета баланса при заданном размере границы $\varepsilon_L = \sigma_L / B_L$.
Процедура повторяется для различных N_L в широком диапазоне значений. Ограничение на N_L сверху: граница не должна охватывать других интенсивных источников выброса, чтобы ожидаемая величина баланса для любой границы оставалась постоянной.



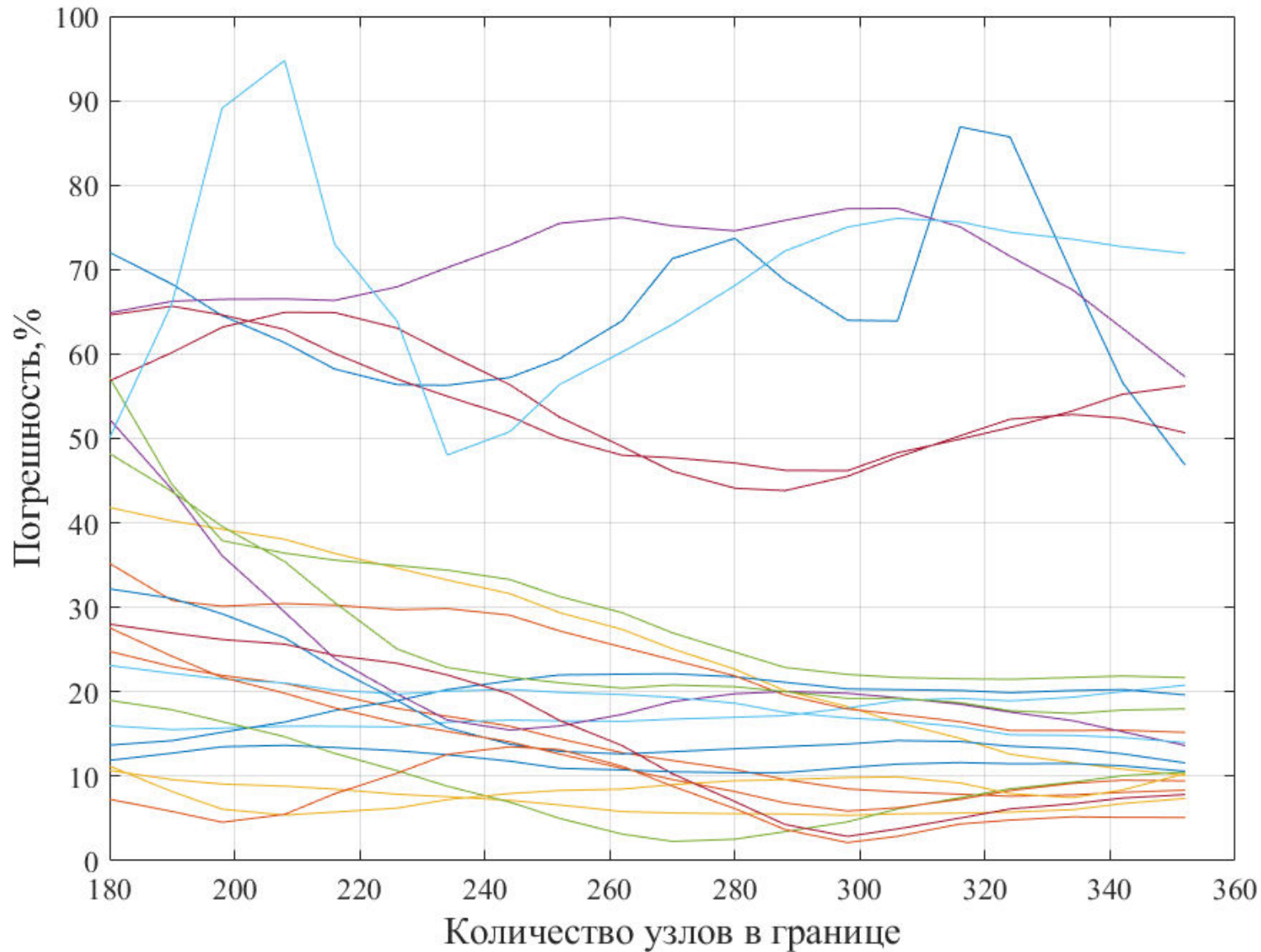
Мощный локальный источник выброса



Совокупность границ размера N_L вокруг источника выброса

$$\sqrt{D \left(\frac{\Delta B_L(t_s, t_e)}{B_L(t_s, t_e)} \right)} \sim \frac{1}{\sqrt{N_L}}$$

Обсуждение результатов



21 лесной пожар;

2018 – 2023 год;

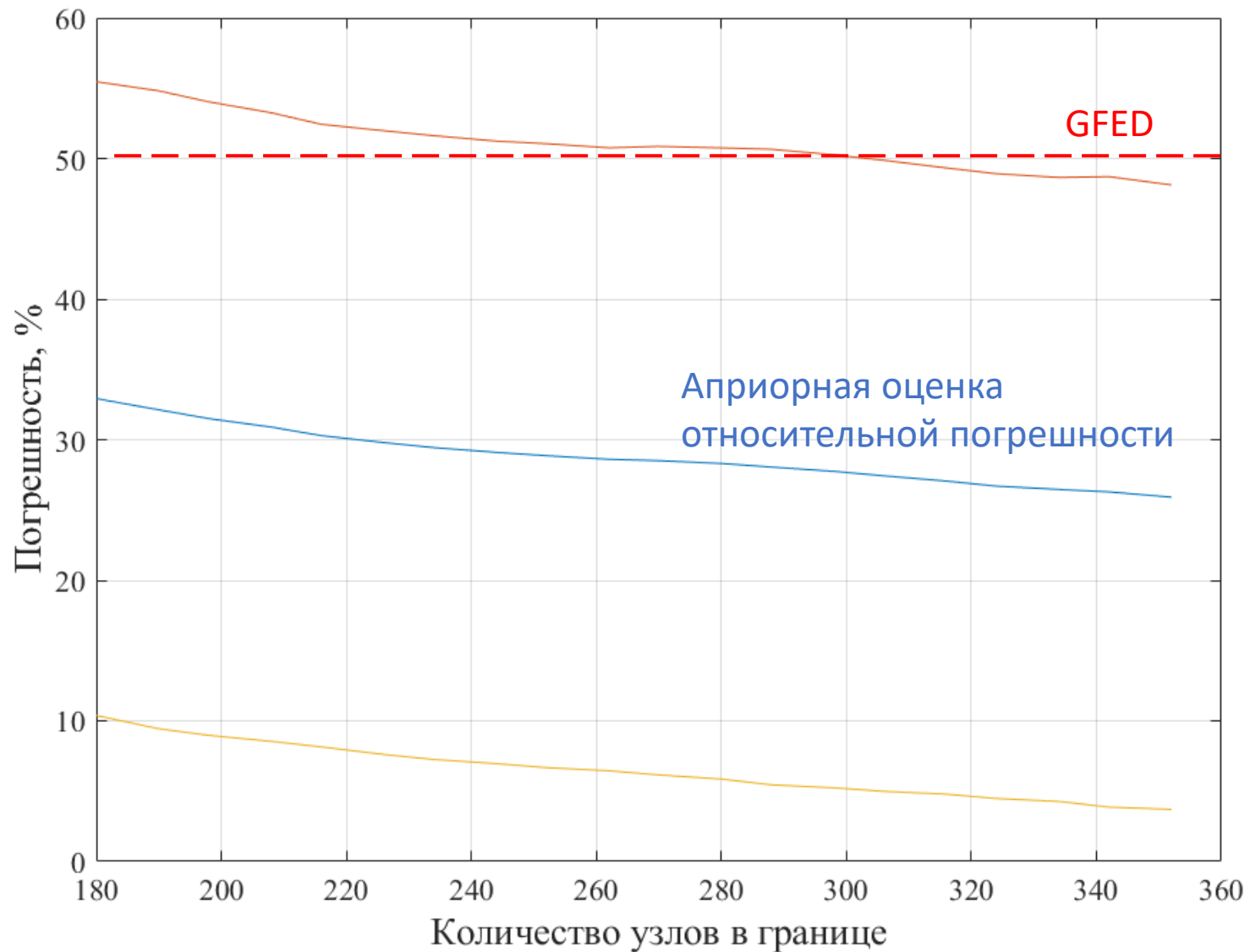
географическое распределение:
Россия (Сибирь) и Канада;

расчет проводился независимо
по каждому суткам горения;

размеры границы (N_L): от 180
до 352 узлов



Объединенная статистика



21 лесной пожар;

2018 – 2023 год;

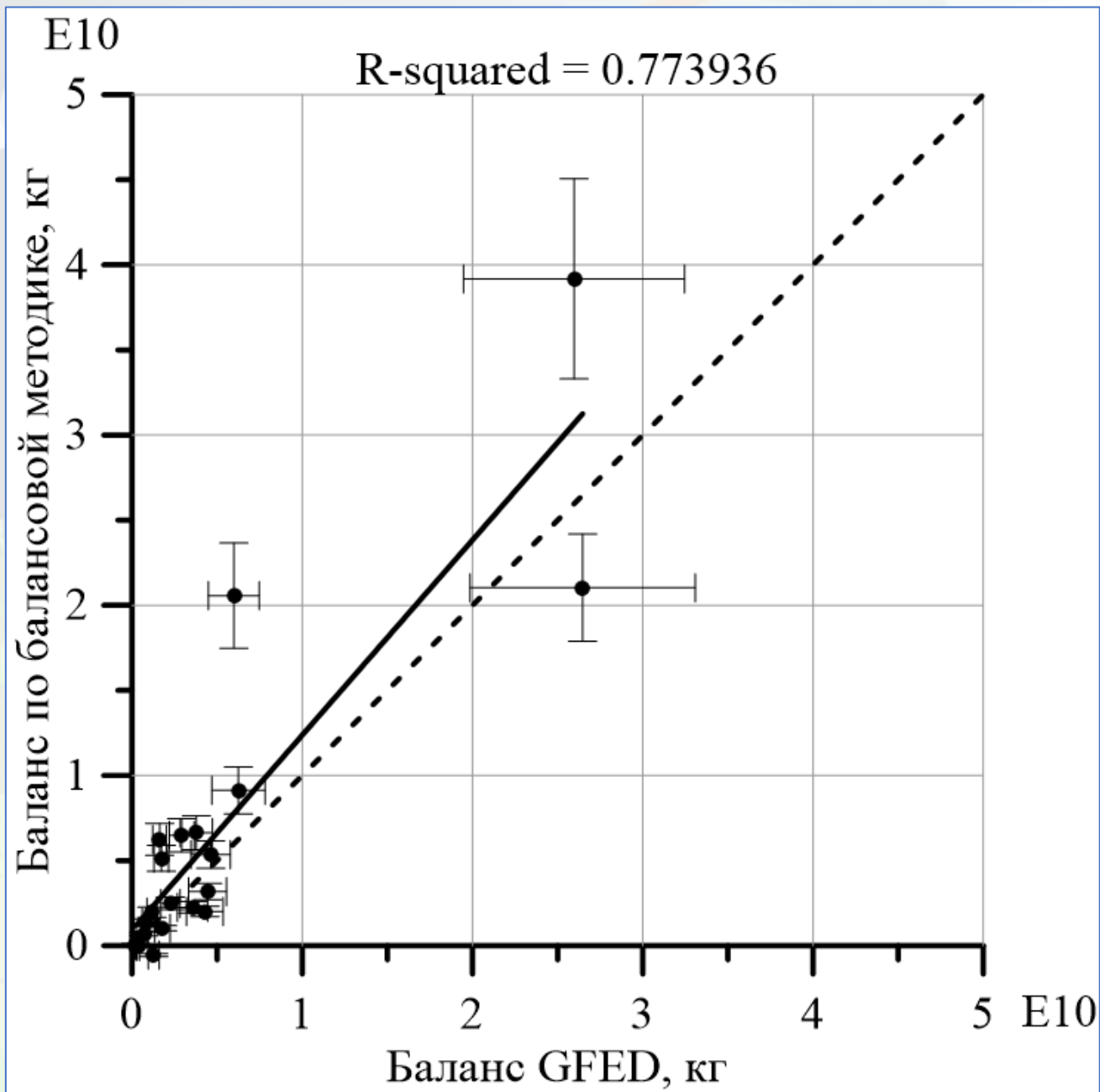
географическое распределение:
Россия (Сибирь) и Канада;

расчет проводился независимо
по каждому суткам горения;

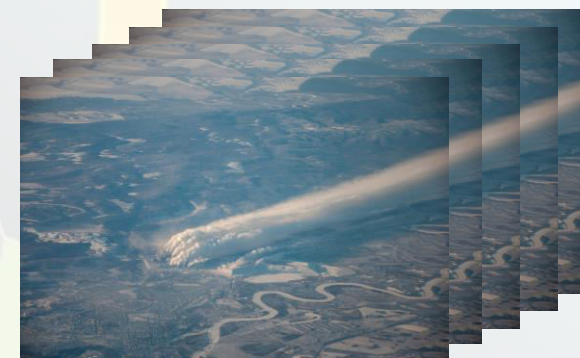
размеры границы (N_L): от 180
до 352 узлов



Сопоставление с GFED



21 лесной пожар;
2018 – 2023 год;
географическое
распределение: Россия
(Сибирь) и Канада



Выводы

1. Разработанная балансовая методика адекватно описывает выбросы CO от крупных лесных пожаров;
2. Предложенная статистическая модель ошибок погрешности подтверждается результатами обработки 21 случая наблюдений (в течение летних сезонов) интенсивных лесных пожаров в России (Сибири) и Канаде за 2018 – 2023 годы;
3. Оценка относительной ошибки вычисления баланса по предложенной методике дает величину, как минимум не хуже ошибки GFED;
4. Таким образом, предложенную балансовую методику можно использовать в качестве независимого инструмента расчета выбросов и поглощения различных газовых компонент, замкнутого относительно данных спутникового мониторинга.

Спасибо за внимание!