

# Углеродный баланс лесов Архангельской области и Республики Коми на основе космического мониторинга

Кабов Олег Александрович

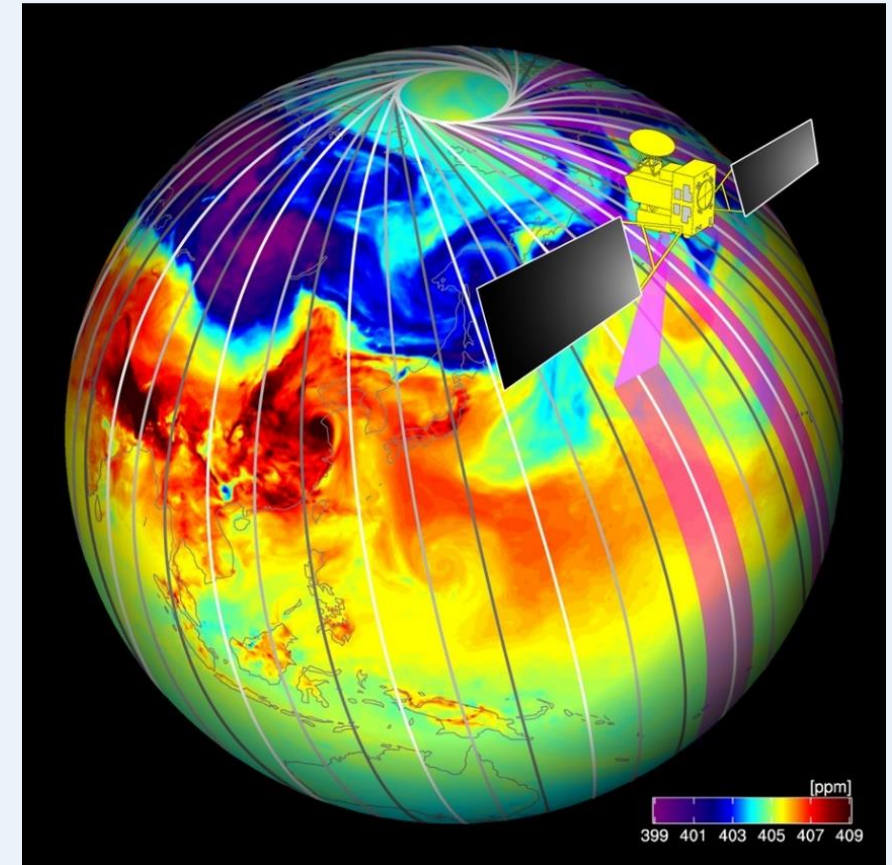
Член корр. РАН, д.ф-м.н., профессор, г.н.с., Советник директора по научным вопросам, Председатель секции Учёного совета ИТ СО РАН «Космическая энергетика, разреженные газы, плазма, микро- и наносистемы», Институт теплофизики СО РАН (Новосибирск)



# Космический мониторинг потоков парниковых газов

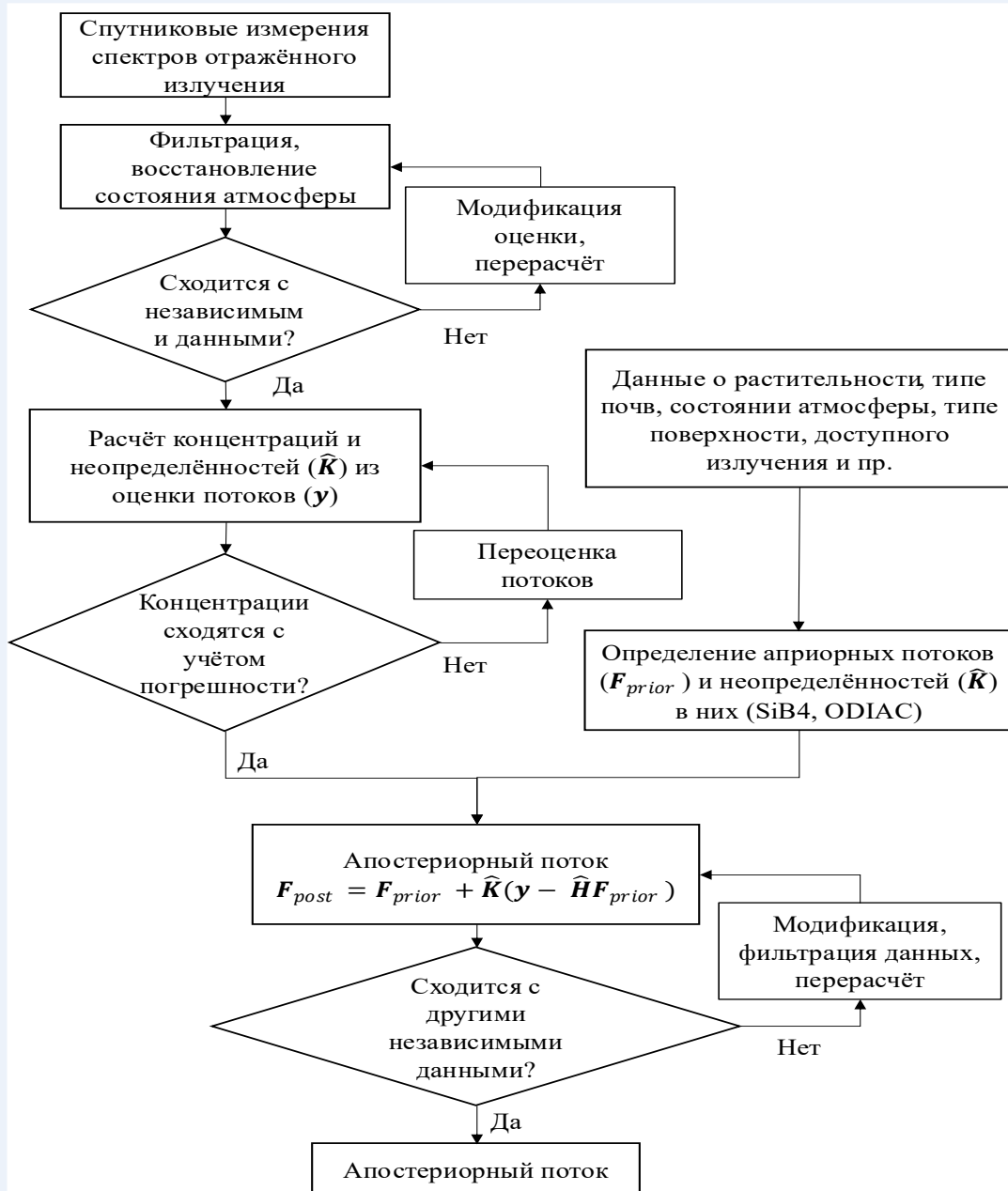
**Цель:** определение пространственно-временного распределения поверхностных потоков парниковых газов

- ❑ В глобальном масштабе прямое измерение потоков вблизи поверхности Земли невозможно из-за огромного количества точечных источников и стоков. Поэтому используется измерение концентраций газов в атмосфере и решение обратной задачи атмосферного переноса.
- ❑ Для получения профилей концентрации необходимо решить ещё одну обратную задачу – определить состояние атмосферы (температура, влажность, давление, скорость ветра ...) по данным спектрометров, установленных на спутниках.
- ❑ Таким образом решаются две обратные задачи.
- ❑ На каждом этапе измерений осуществляется как верификация полученных данных, так и использование некоторых модельных априорных данных (они постепенно модифицируются) для получения устойчивой оценки.



Спектрометрами на борту измеряется интенсивность солнечного света в столбе атмосферы, отражённого от Земли, в узких спектральных диапазонах поглощения (полосы вблизи 1.61 мкм для CO<sub>2</sub> и др.), [Tanimoto et al., 2025].

# Алгоритм расчёта потоков CO<sub>2</sub> по данным космического мониторинга



- ❑ В представленной работе используются данные Центра Годдард НАСА полученные по линейризованной модели потоков (LoFI), [Weir et al., 2021]
- ❑ Разрешение по времени составляет 24 часа
- ❑ Пространственное разрешение обработанных данных спутникового зондирования составляет 0.5° по широте × 0.625° по долготе, т.е. 55.6 км x 31 км
- ❑ Обоснованием для использования инверсионных методов служит тот факт, что атмосферный перенос подчиняется известным физическим законам гидродинамики (уравнения Навье-Стокса и др.)
- ❑ Для получения данных дополнительно используется: прямое солнечное излучение в инфракрасном диапазоне измеряется Фурье-спектрометрами высокого разрешения на Земле; самолёты; наземные станции; результаты других центров и многое другое.

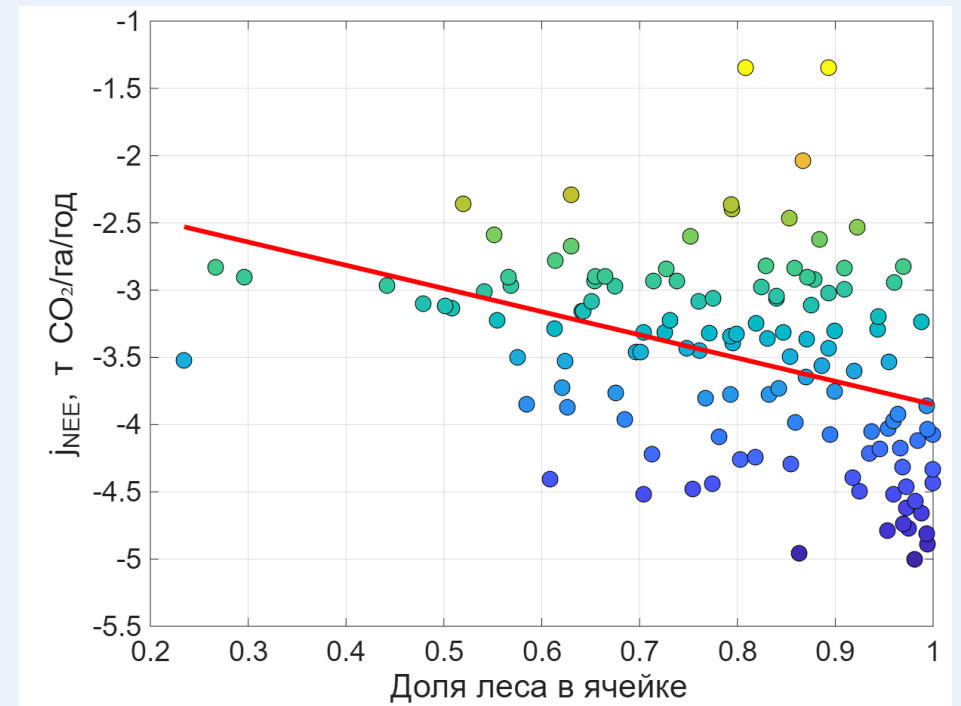
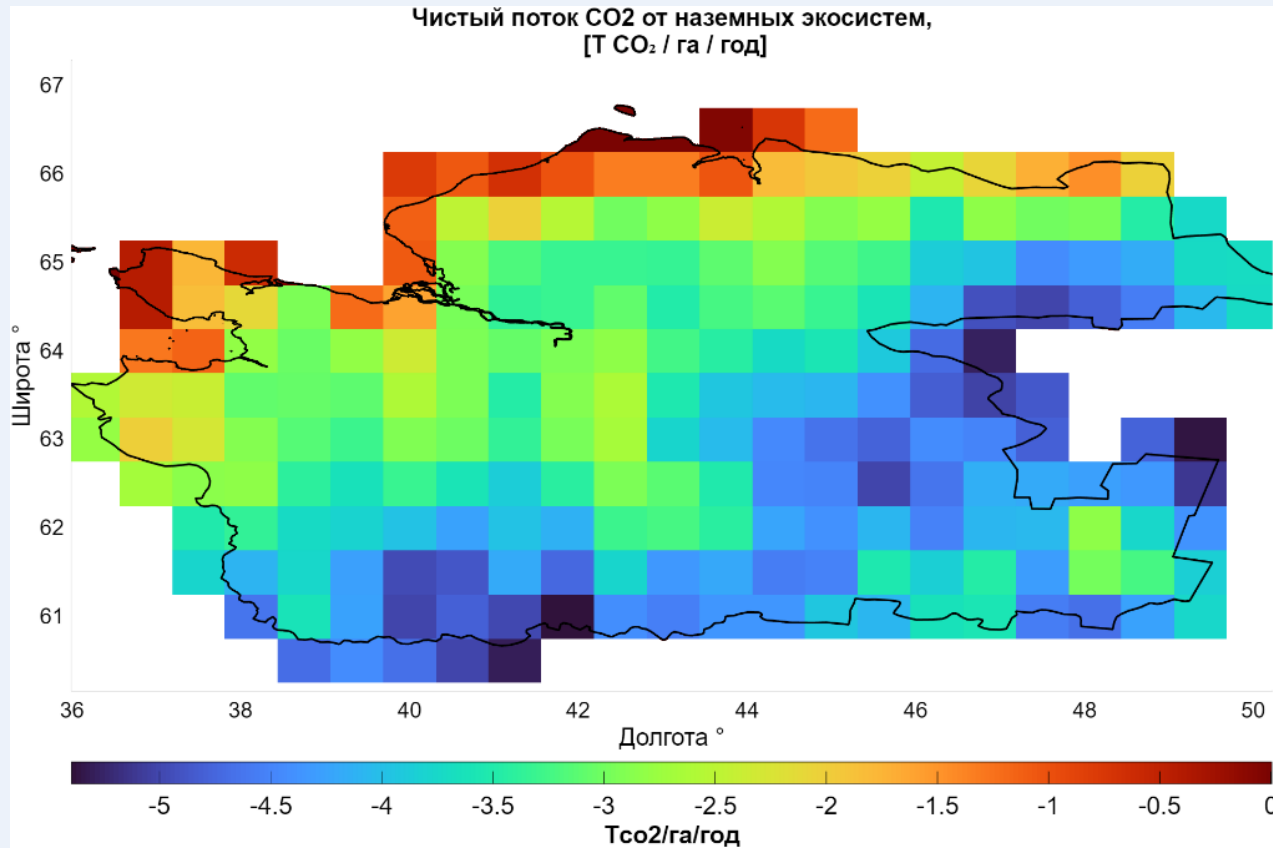
# Расположение модельных регионов

## Критерии выбора Архангельской области и Республики Коми:

- ❑ Для этих регионов характерна невысокая плотность населения: в Архангельской области 2,8 человек на км<sup>2</sup>, в Республике Коми – менее 2 чел. на км<sup>2</sup>.
- ❑ Леса относятся к зонам притундровых лесов, редкостойной тайги и таежной зоне.
- ❑ Общая площадь лесных земель Архангельской области по состоянию на 2025 г. равняется 22 930,0 тыс. га, а Республики Коми 30 350,0 тыс. га.
- ❑ Лесистость территории Архангельской области составляет порядка ~ 60%, Республики Коми ~ 73 %.



# Пространственное распределение удельного потока чистого экосистемного обмена $\text{CO}_2$ ( $j_{NEE}$ т $\text{CO}_2$ /га/год), Архангельская обл., 2021 г.



**Зависимость чистого экосистемного обмена ( $j_{NEE}$ , т $\text{CO}_2$ /га/год) от доли площади леса в измерительной ячейке**

**Даже при относительно низком пространственном разрешении, метод сохраняет чувствительность к неоднородности растительного покрова внутри измерительной ячейки.**

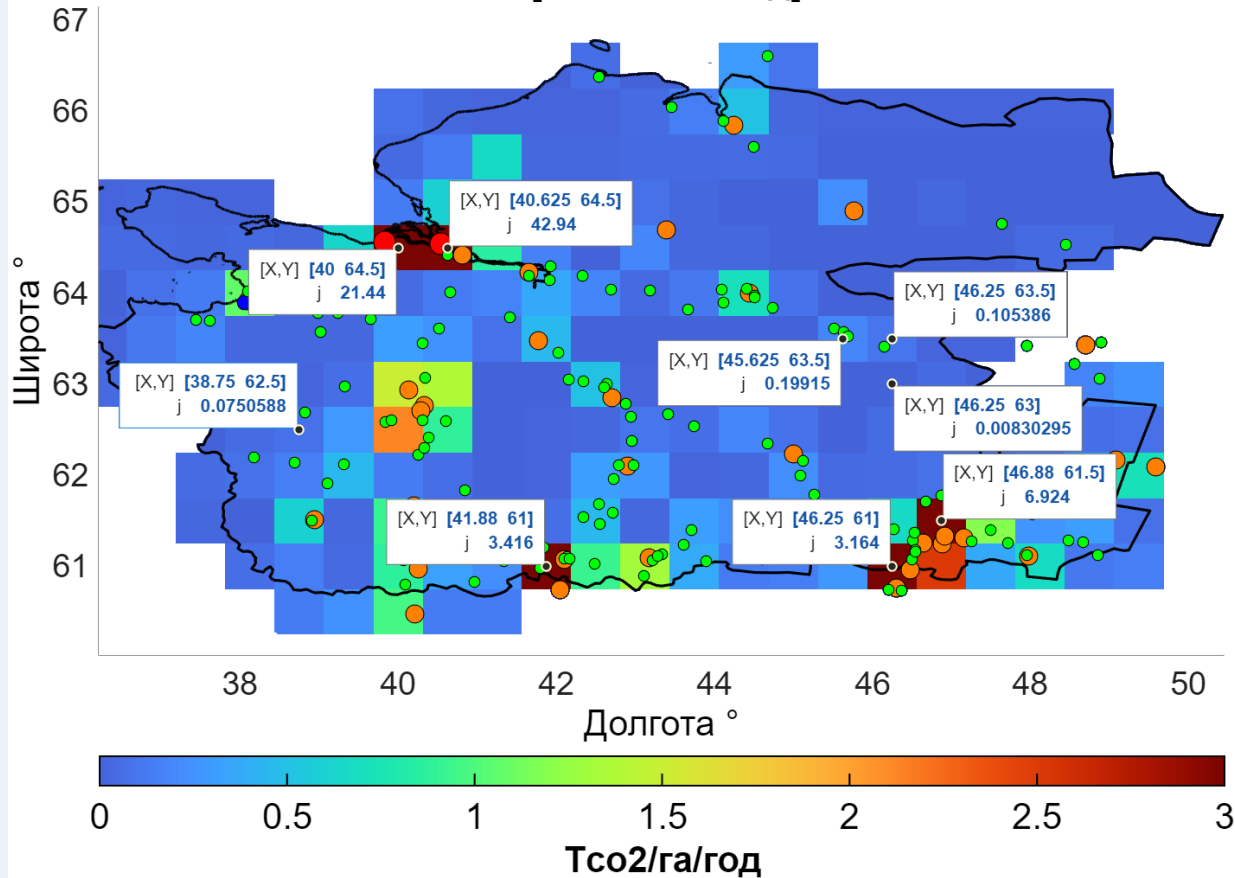
Удельный поток чистого экосистемного обмена  $j_{NEE}$  определяется как разность между валовым фотосинтезом (GPP) и фотодыханием ( $R_p$ ), поддерживающим дыханием ( $R_m$ ) и ростовым дыханием ( $R_s$ ) автотрофных растений, а также гетеротрофным дыханием ( $R_h$ ) животных и микроорганизмов:

$$j_{NEE} = j_{GPP} - j_{Rp} - j_{Rm} - j_{Rs} - j_{Rh}$$

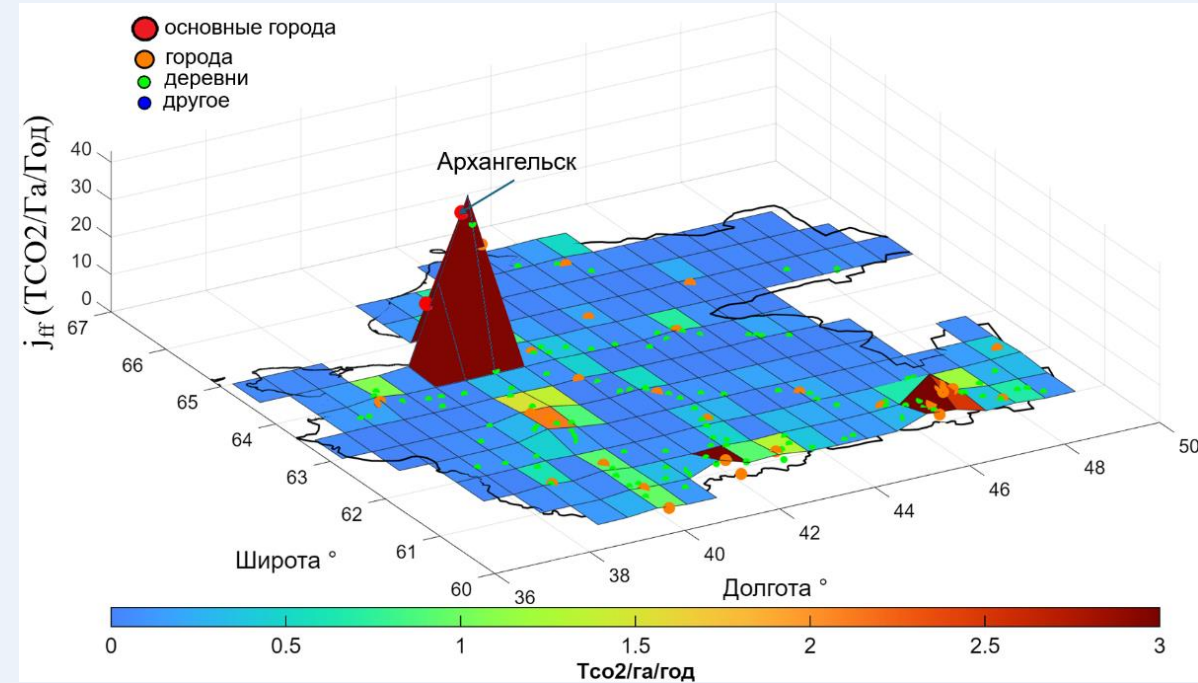
Интегральный чистый экосистемный обмен по материковой части А.О. за 2021 г.  $J_{NEE} = -105.1$  Мт $\text{CO}_2$ /год

# Выбросы от сжигания ископаемого и биотоплива в Архангельской области за 2021г. ( $j_{ff}$ тСО<sub>2</sub>/га/год)

Выбросы CO<sub>2</sub> от сжигания ископаемого топлива и биотоплива, [Т СО<sub>2</sub> / га / год]



## Изометрическая проекция

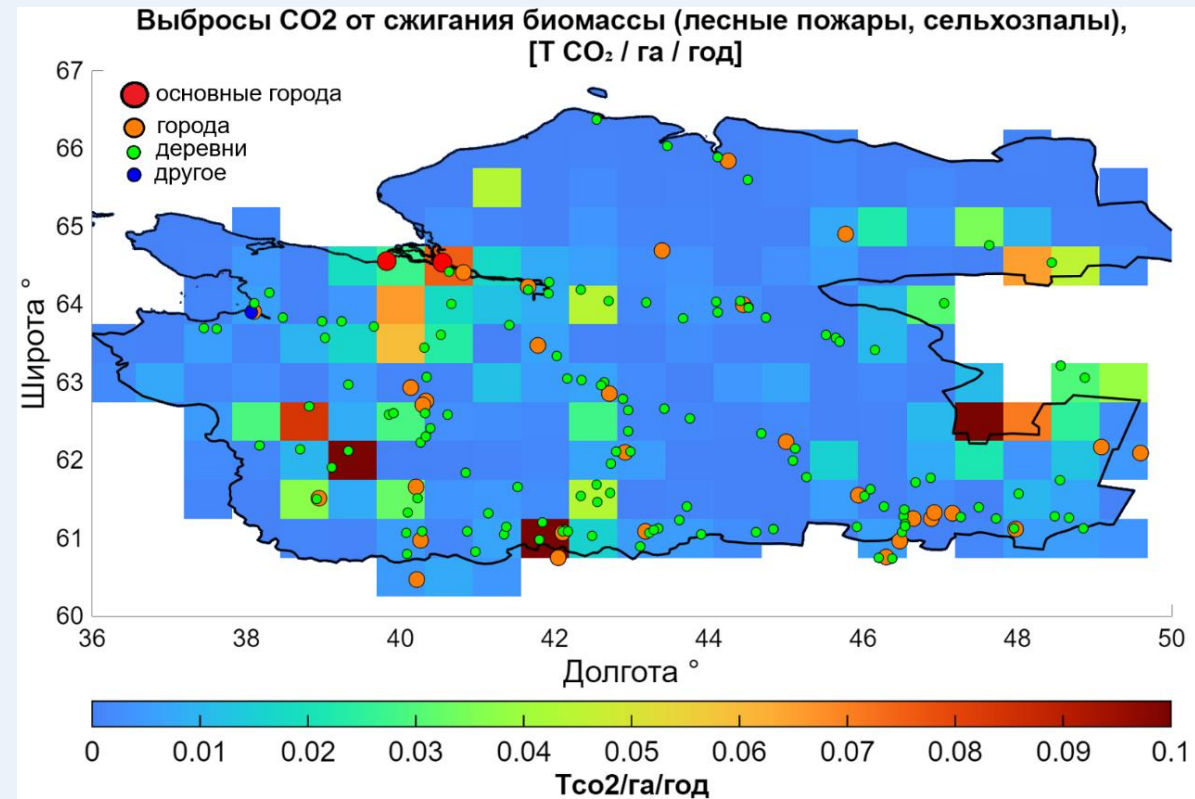


**Антропогенные источники уверенно идентифицируются. Отсутствие выбросов в Ненаселённых районах подтверждает адекватность пространственной привязки данных.**

Максимальная эмиссия CO<sub>2</sub> приходится на ячейку, соответствующую г. Архангельск ( $j_{ff} = 43$  тСО<sub>2</sub>/га/год и г. Северодвинск ( $j_{ff} = 21$  тСО<sub>2</sub>/га/год). Ненулевые значения эмиссии CO<sub>2</sub> в подавляющем большинстве случаев географически приурочены к ячейкам, в которых расположены населённые пункты.

Интегральная эмиссия от сжигания ископаемого и биотоплива по А.О. за 2021 г.  $J_{ff} = 17.8$  МтСО<sub>2</sub>/год

# Распределение выбросов от сжигания биомассы за 2021г в А.О.

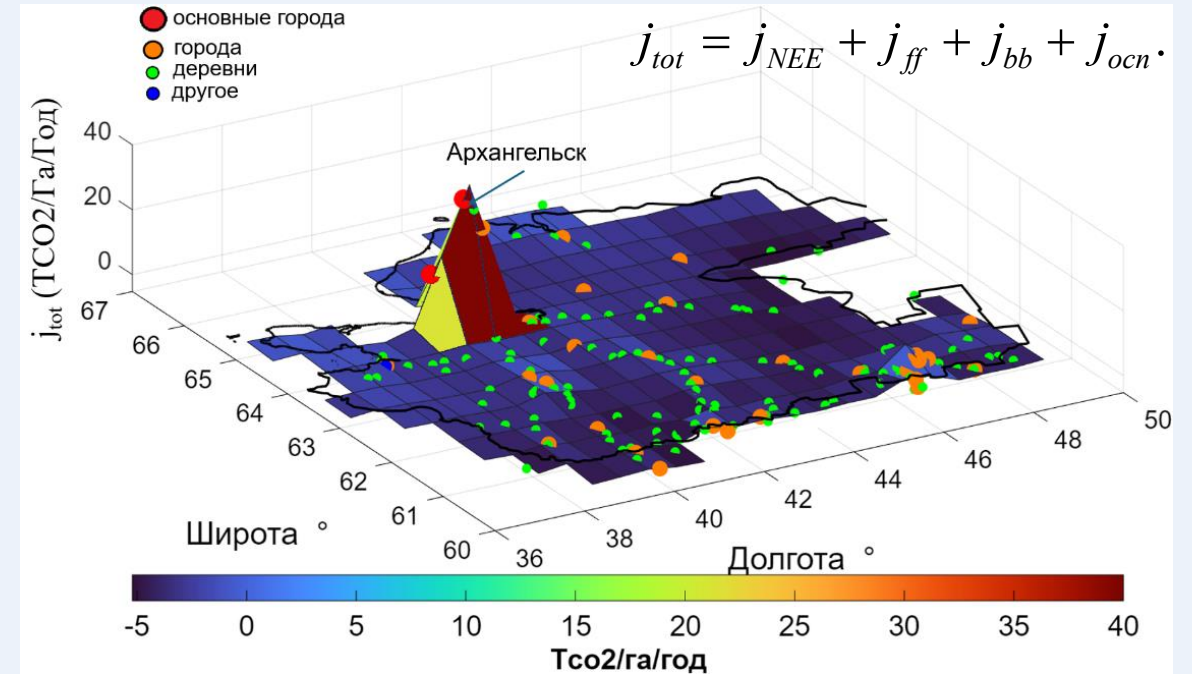


Оценка эмиссии CO<sub>2</sub>, обусловленной природными и антропогенными пожарами, и включает сгорание наземной фитомассы, лесной подстилки, торфа, сельскохозяйственные палы.

Интегральные выбросы от сжигания биомассы по материковой части А.О. за 2021 г.  $J_{bb} = 0.27$  МтСО<sub>2</sub>/год

Суммарное интегральное значение потока от всех природных и антропогенных источников  $J_{tot} = -88$  МтСО<sub>2</sub>/год

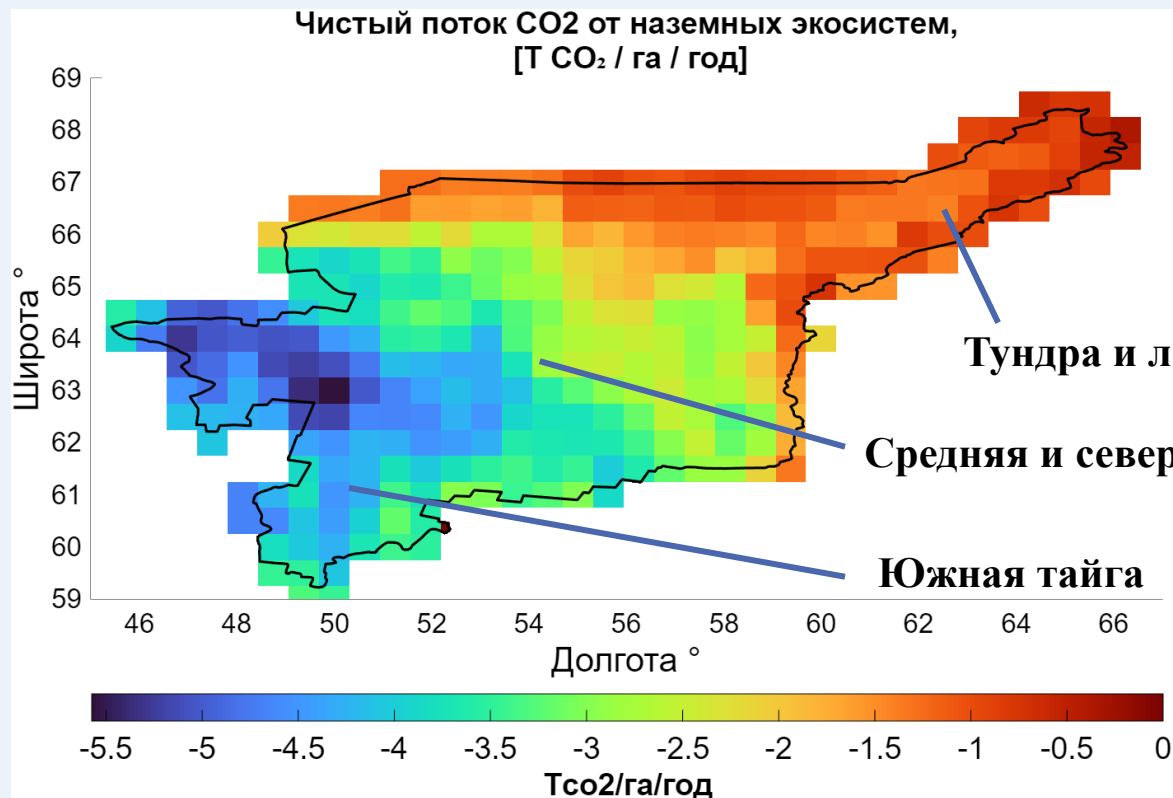
# Суммарный удельный поток CO<sub>2</sub> от всех природных и антропогенных источников $J_{tot}$ тСО<sub>2</sub>/га/год в А.О. за 2021 г.



$j_{NEE}$  — нетто-обмен наземных экосистем,  $j_{ff}$  — антропогенные выбросы от сжигания ископаемого и биотоплива,  $j_{bb}$  — эмиссии от горения биомассы и пожаров,  $j_{ocn}$  — нетто-обмен с океаном, включая территориальные воды

Видно, что за исключением некоторых городов наблюдается отрицательный удельный поток, то есть поглощение CO<sub>2</sub>.

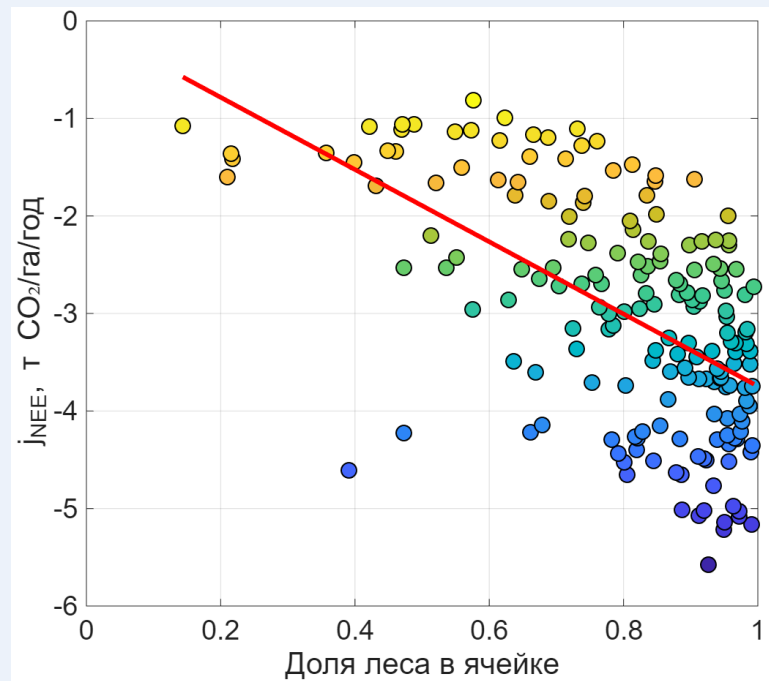
# Пространственное распределение чистого экосистемного обмена ( $j_{NEE}$ тСО<sub>2</sub>/га/год) в Республике Коми за 2021 г.



Удельный поток чистого экосистемного обмена  $j_{NEE}$  определяется как разность между валовым фотосинтезом (GPP) и фотодыханием ( $R_p$ ), поддерживаемым дыханием ( $R_m$ ) и ростовым дыханием ( $R_s$ ) автотрофных растений, а также гетеротрофным дыханием ( $R_h$ ) животных и микроорганизмов:

$$j_{NEE} = j_{GPP} - j_{Rp} - j_{Rm} - j_{RS} - j_{Rh}$$

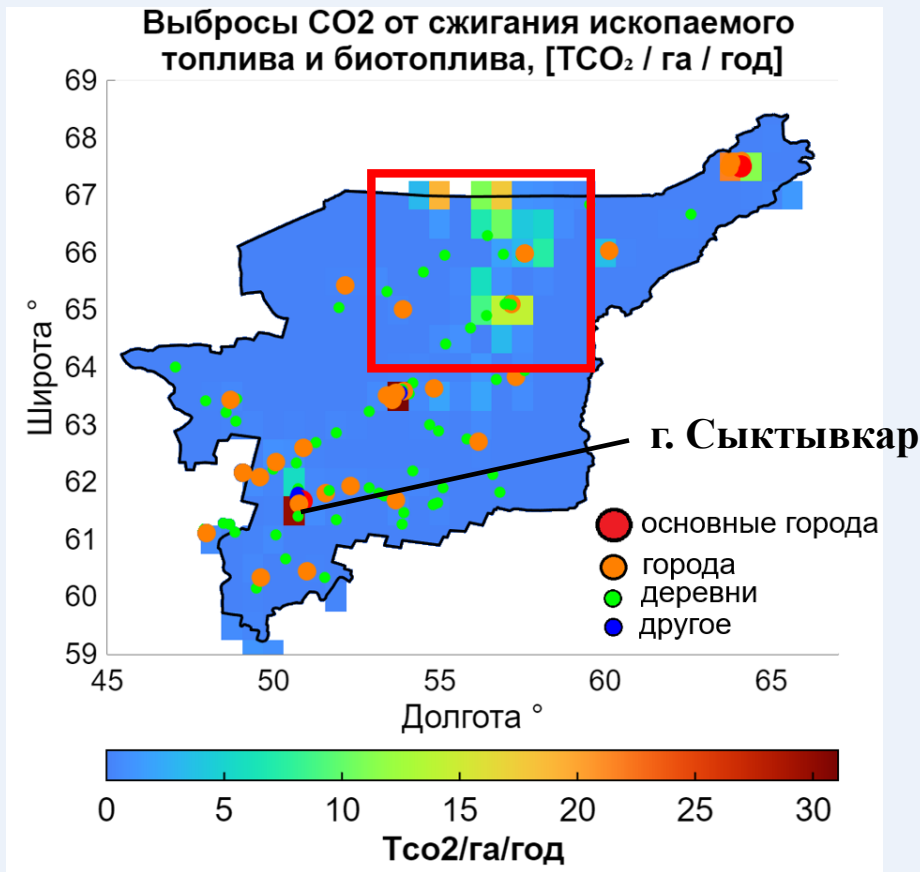
Интегральный чистый экосистемный обмен в Республике Коми за 2021 г.  $J_{NEE} = -122$  МтСО<sub>2</sub>/год



Зависимость чистого экосистемного обмена ( $j_{NEE}$ , тСО<sub>2</sub>/га/год) для Республики Коми за 2021г. от доли площади леса в измерительной ячейке

**Космический мониторинг имеет хорошую чувствительность к неоднородности растительного покрова и улавливает изменение чистого экосистемного обмена в зависимости от типа растительности и климатических зон**

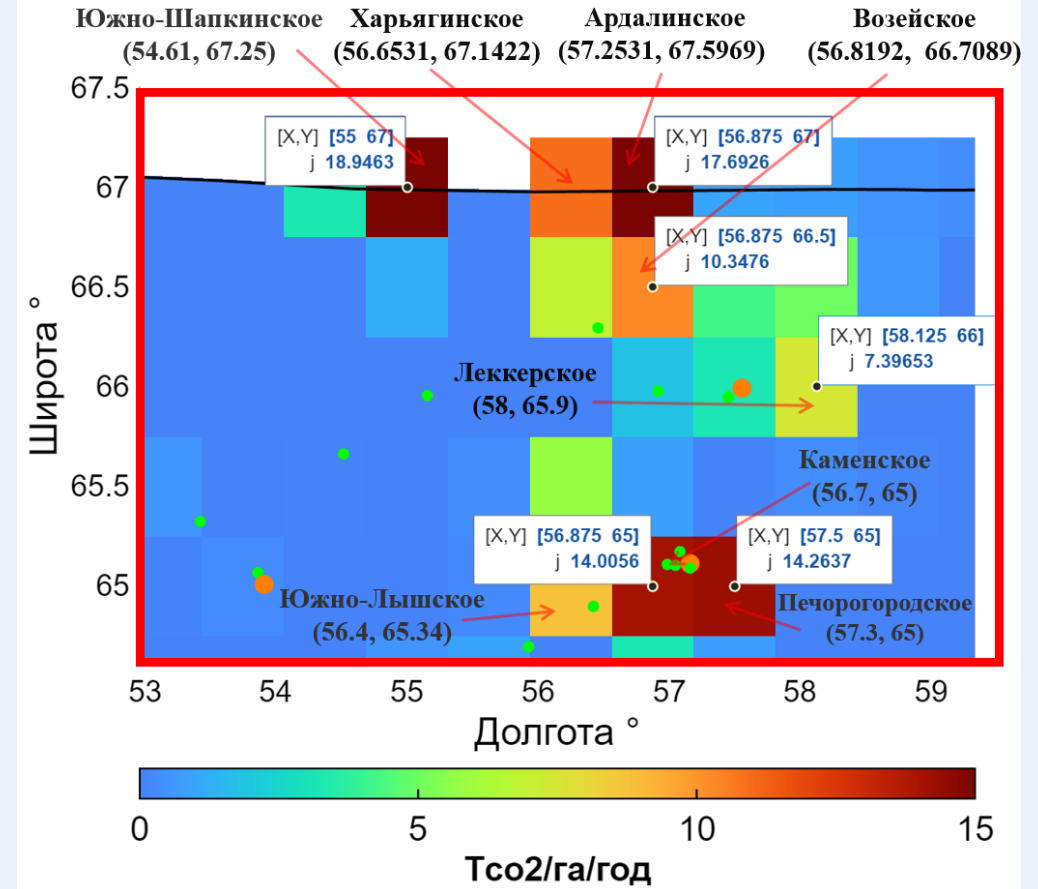
# Выбросы от сжигания ископаемого и биотоплива $j_{ff}$ тСО<sub>2</sub>/га/год за 2021 г. в Республике Ком



Максимальная эмиссия CO<sub>2</sub> приходится на ячейку, соответствующую г. Сыктывкар (до 30 тСО<sub>2</sub>/га/год), а также в ячейку, в пределах которой расположена агломерация нескольких населённых пунктов

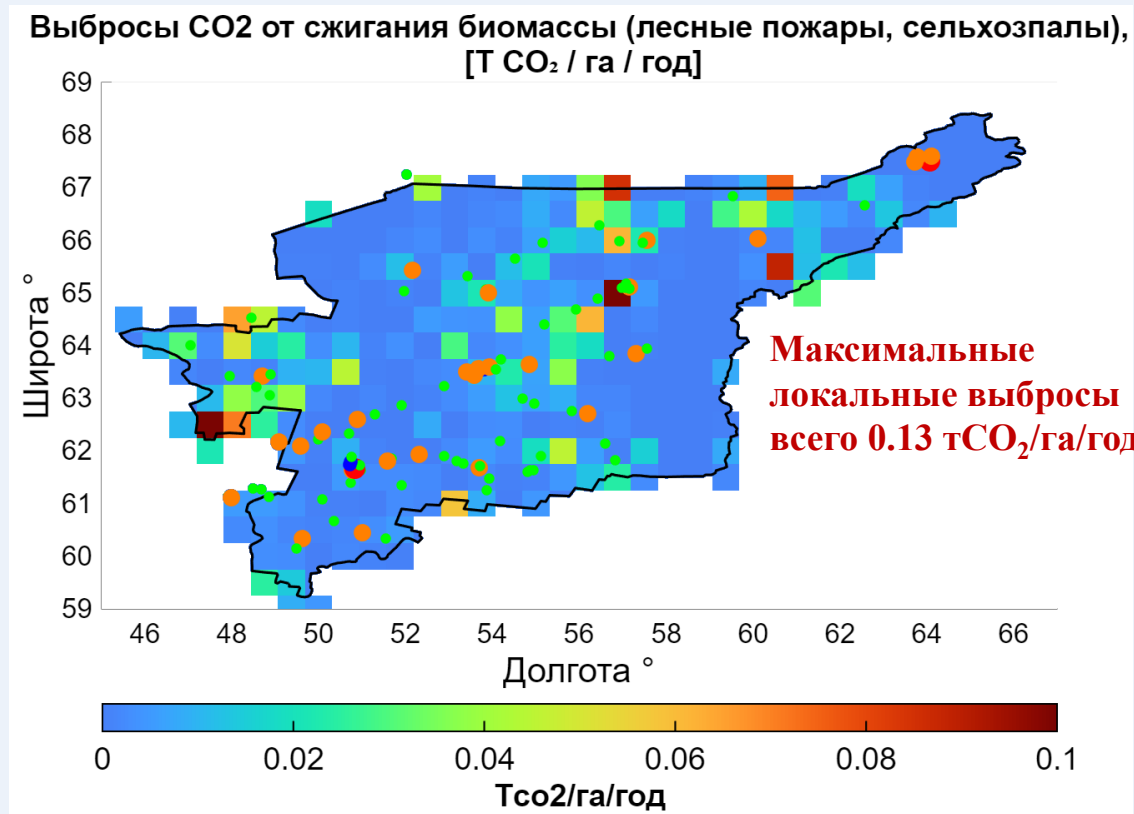
Интегральная эмиссия от сжигания ископаемого и биотоплива в Республике Коми за 2021 г.  $J_{ff} = 40.7$  МтСО<sub>2</sub>/год

## Увеличенный фрагмент ячеек внутри красной рамки



Выявлены ячейки без зарегистрированных населённых пунктов, но с детектируемой эмиссией CO<sub>2</sub>, где выбросы обусловлены нефтегазовыми месторождениями (факельное сжигание попутного газа, энергоустановки, транспортная и технологическая инфраструктура)

## Распределение выбросов от сжигания биомассы $j_{bb}$ в Республике Коми за 2021 г.

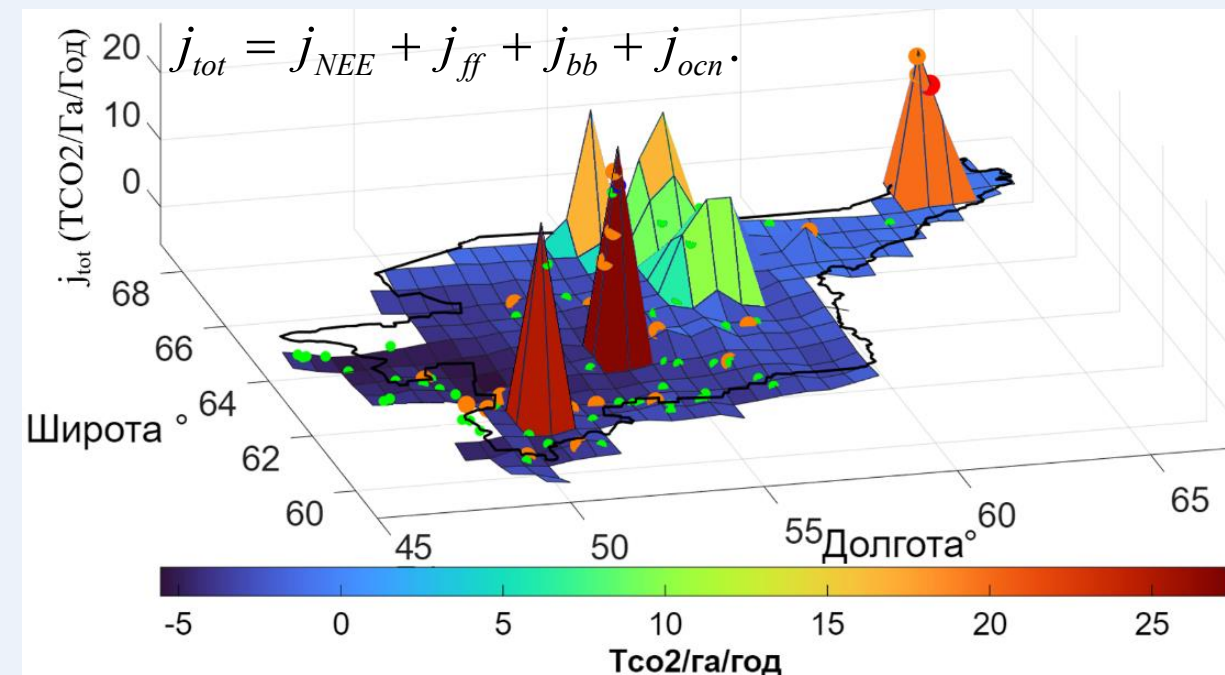


Оценка эмиссии CO<sub>2</sub>, обусловленной природными и антропогенными пожарами, и включает сгорание надземной фитомассы, лесной подстилки, торфа, сельскохозяйственные палы

Интегральные выбросы от сжигания биомассы в Республике Коми за 2021 г.  $J_{bb} = 0.34$  МтСО<sub>2</sub>/год

Суммарное интегральное значение потока от всех природных и антропогенных источников  $J_{tot} = -81$  МтСО<sub>2</sub>/год

## Суммарный удельный поток CO<sub>2</sub> от всех природных и антропогенных источников $j_{tot}$ тСО<sub>2</sub>/га/год в Республике Коми за 2021 г.

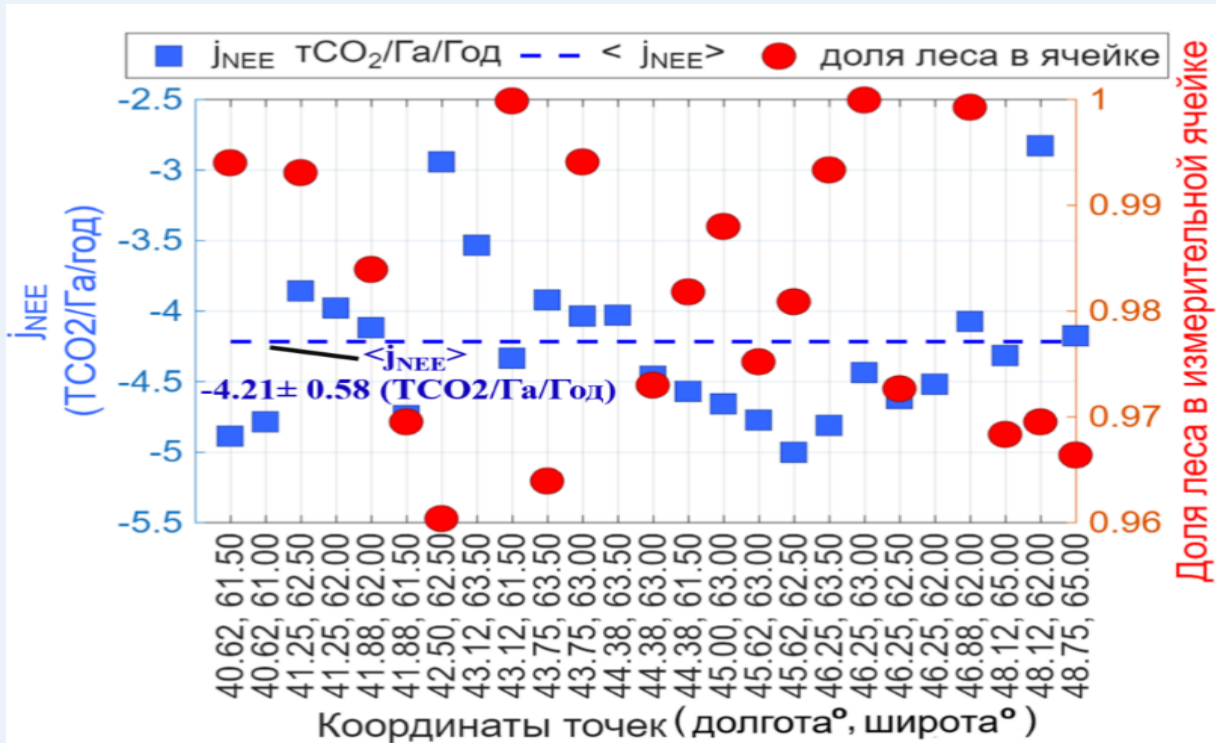


$j_{NEE}$  — нетто-обмен наземных экосистем,  $j_{ff}$  — антропогенные выбросы от сжигания ископаемого и биотоплива,  $j_{bb}$  — эмиссии от горения биомассы и пожаров,  $j_{ocn}$  — нетто-обмен с океаном, включая территориальные воды

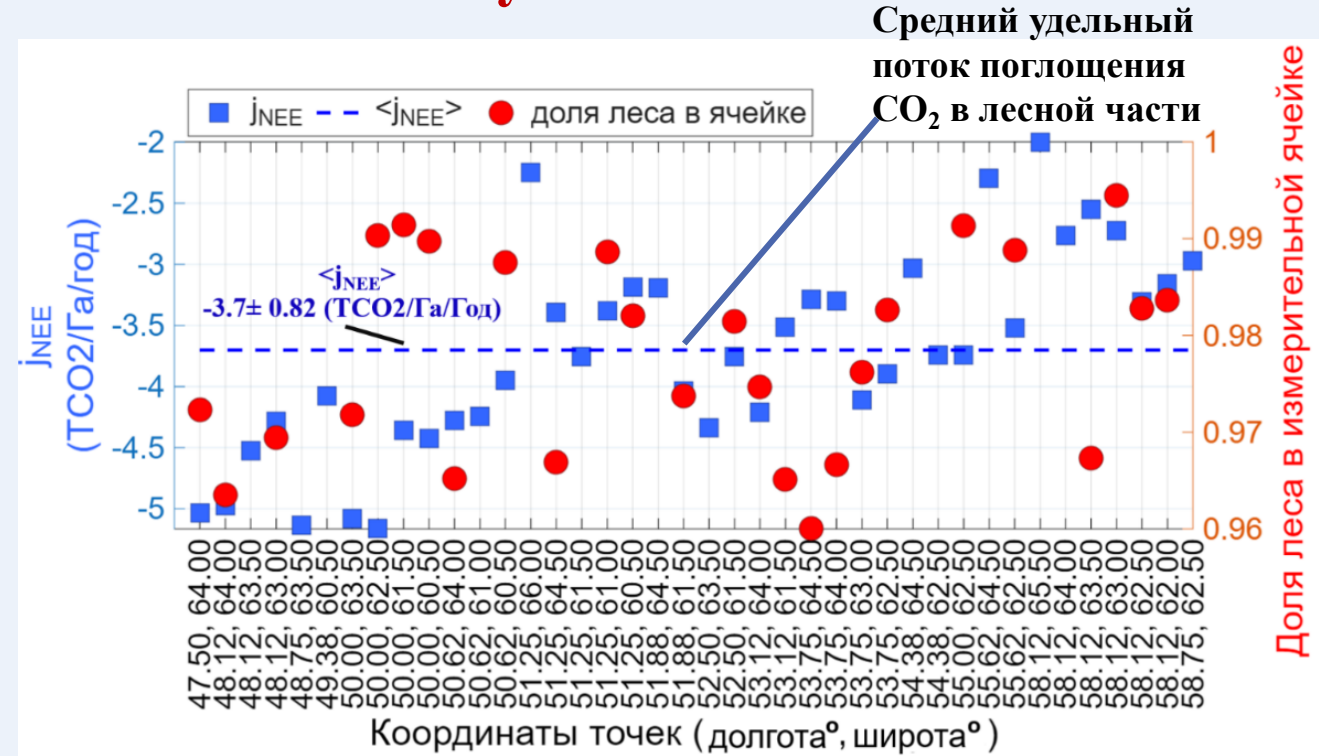
Видно, что за исключением городов и нефтегазовых месторождений наблюдается отрицательный удельный поток, то есть поглощение CO<sub>2</sub>

# Валидация: Удельный поток чистого экосистемного обмена $j_{NEE}$ в измерительных ячейках, в которых доля лесного покрова превышает 95% (2021г.)

## Архангельская область



## Республика Коми



Сравнение потока чистого экосистемного обмена  $j_{NEE}$  с расчетными данными чистой экосистемной продукции (NEP) на основе государственной инвентаризации лесов (годовое приращение фитомассы и мертвого органического вещества) [Филипчук А.Н. и др.]

- 4.25 ± 0.64 тСО<sub>2</sub>/га/год; Отличие 1 %    - 3.52 ± 0.52 тСО<sub>2</sub>/га/год; Отличие 5.1 %

## Заключение:

- ❑ **Расхождение** между чистым экосистемным обменом (NEE) по спутниковым данным и чистой экосистемной продукцией (NEP) по данным государственной инвентаризации лесов составило 1% для Архангельской области и 5% для Республики Коми, что существенно меньше неопределенности оценки каждого из рассматриваемых показателей.
- ❑ Космический мониторинг потоков  $\text{CO}_2$  – это **перспективный метод** количественной оценки баланса углерода, а также антропогенных и природных эмиссий в лесных и наземных экосистемах в целом, позволяющий улучшить понимание их роли в глобальных биохимических процессах.
- ❑ Для повышения достоверности спутниковые измерения требуют тщательной **верификации.**

## **Вклад:**

**Нигматулин Б.И.<sup>1</sup>, Филипчук А.Н.<sup>2</sup>, Кабов О.А.<sup>3</sup>, Малышева Н.В.<sup>2</sup>, Мунгалов А.С.<sup>3</sup>, Сибиряков Н.Е.<sup>3</sup>, Салтанов А.Г.<sup>1,4</sup>, Золина Т.А.<sup>2</sup>, Кочкин Д.Ю.<sup>3</sup>, Чеверда В.В.<sup>3</sup>, Рогулев Е.С.<sup>1</sup>**

**1- Институт проблем энергетики 115035, Москва, Садовническая, д. 11, строение 12**

**2- Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, Пушкино, ул. Институтская, 15**

**3- Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1**

**4- РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 119991, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д. 65**

**БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!**

