

Оценки антропогенных эмиссий климатически важных атмосферных газов

Тимофеев Ю.М., Неробелов Г.М., Поберовский А.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Введение

- Климатически важные (КВ) **газы** играют значительную роль в формировании радиационного баланса и экологического состояния планеты, и как следствие, **глобального, регионального и городского климата Земли**
- **ВМО опубликовала доклад «United in Science» за 2023 год:**
 - Общий объем выбросов углекислого газа (CO_2) от ископаемого топлива в 2022 году **увеличился на 1 % по сравнению с 2021 годом.**
 - По предварительным оценкам, мировые антропогенные выбросы CO_2 от ископаемого топлива в январе-июне **2023 г. были на 0.3 % выше**, чем за аналогичный период **2022 г.**
- **Антропогенные эмиссии CO_2 с территорий больших городов составляют ~70% от суммарных антропогенных выбросов этого газа.**

Методы оценки антропогенных эмиссий парниковых газов

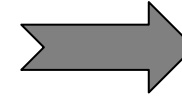
1. Инвентаризация

- Используется информация, косвенно характеризующая антропогенные эмиссии газа - количество используемого ископаемого топлива, положения ТЭЦ, автомобильных дорог, промышленных предприятий и др.
- Погрешности инвентаризаций могут достигать **более 50%**¹

¹Bergamaschi et al., 2015
Locatelli et al., 2013
Basu et al., 2018

2. Решение обратной задачи атмосферного переноса

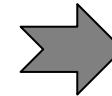
Данные измерений
содержания



- Локальные
- Дистанционные



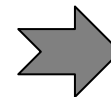
Моделирование
переноса газа в
атмосфере



- Трехмерные модели атмосферного переноса
- Дисперсионные модели
- Боксовые модели
- Другие модели



Априорная
информация



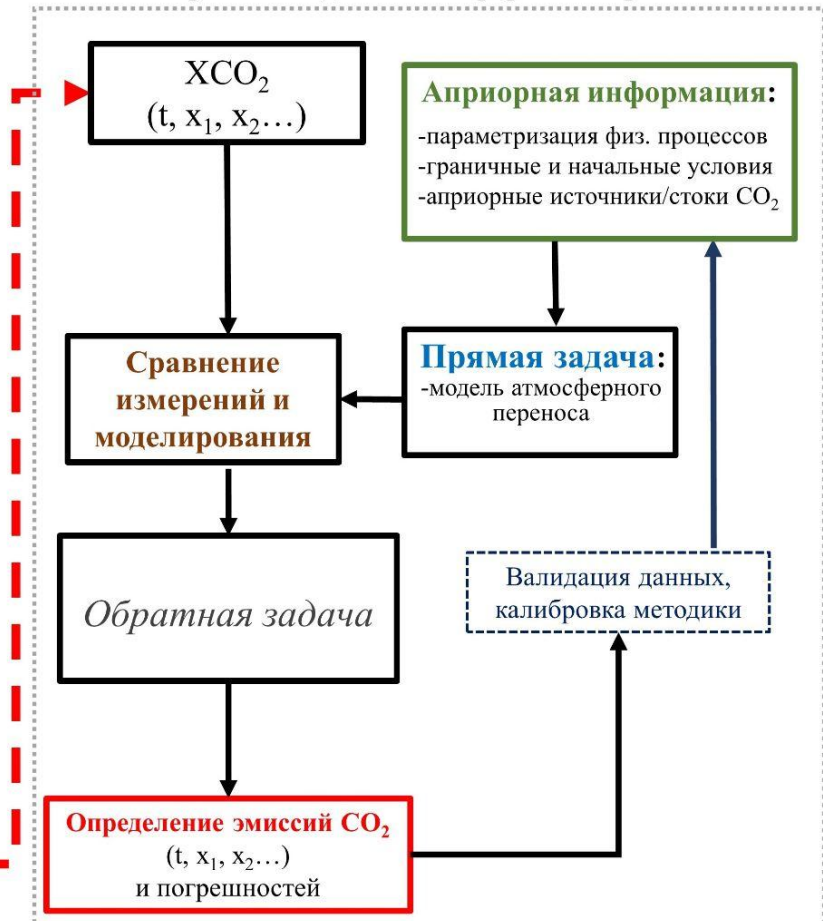
- Источники и стоки газа
- Начальные и граничные условия моделирования переноса

Схема решения обратной задачи для оценки антропогенных эмиссий парниковых газов (на примере CO_2)

1. Обратная задача атмосферной оптики



2. Обратная задача атмосферного переноса

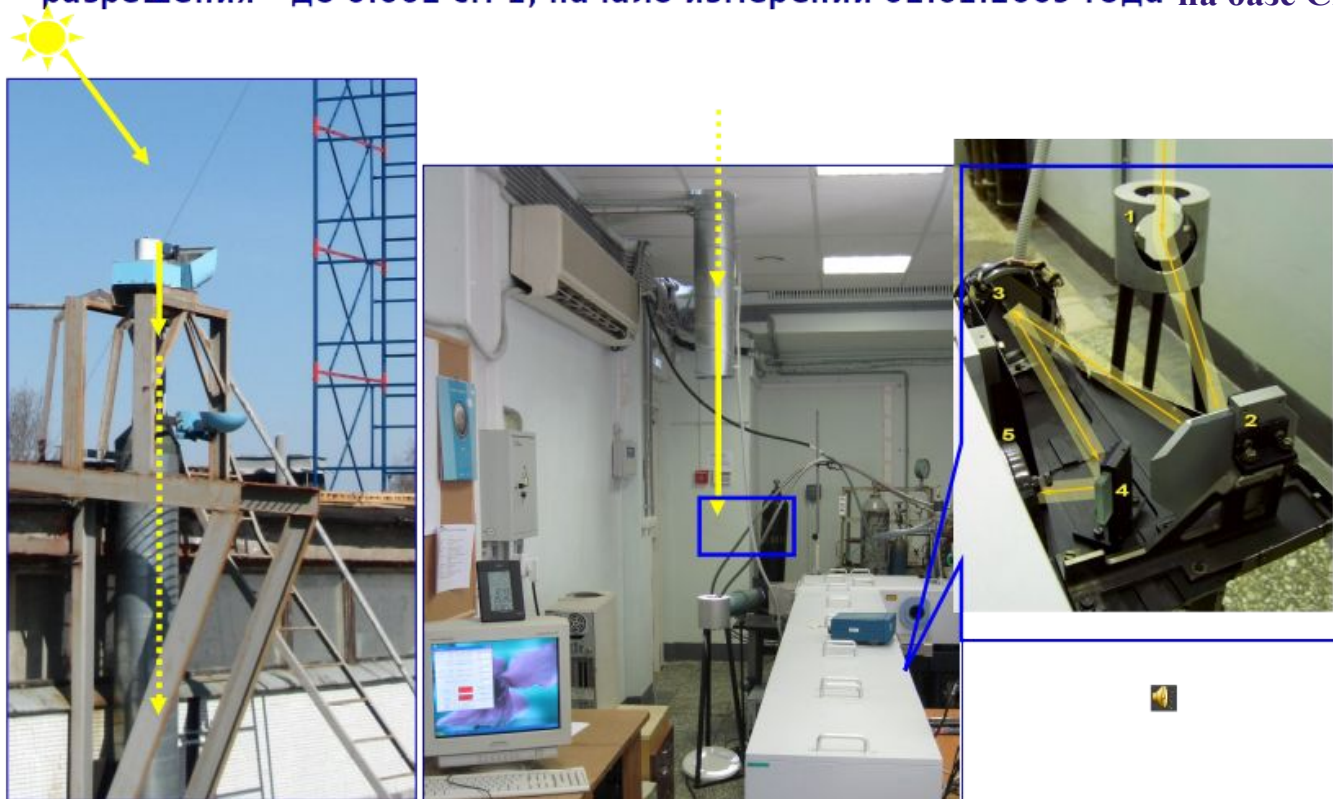


- Решение первой обратной задачи – атмосферной оптики - **хорошо изучено** (погрешности восстановления ОС CO_2 ~0.05 ppm для наземных и 0.5 ppm для спутниковых измерений).
- Решение обратной задачи атмосферного переноса **изучено хуже**. Решение сильно зависит от **прямого оператора** (модели атмосферного переноса) и **априорной информации** (например, пространственного распределения антропогенных эмиссий CO_2)

Спектроскопические наземные измерения общего содержания газов (всего ~25) в районе Санкт-Петербурга

SPbU FTIR system

Фурье интерферометр Bruker IFS125HR, высокого спектрального разрешения - до 0.002 см⁻¹, начало измерений 02.01.2009 года на базе СПбГУ



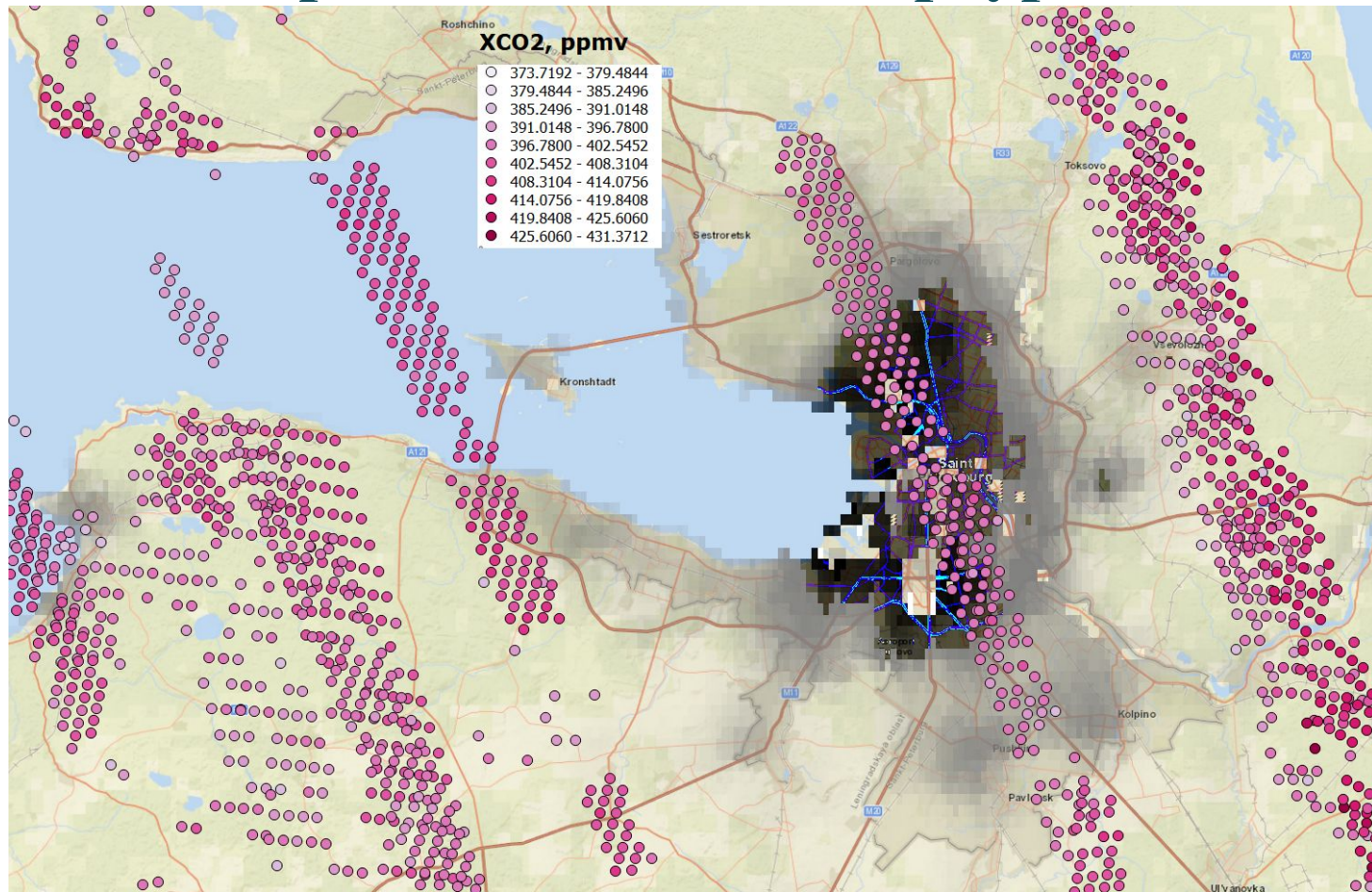
Плюс:

высокая точность измерений

Минус:

нет доступных аналогов для приобретения в России

Измерений CO_2 с помощью спутника ОСО-2 в районе Санкт-Петербурга



Плюс:

- высокое пространственное разрешение измерений (2-3 км)
- глобальное покрытие

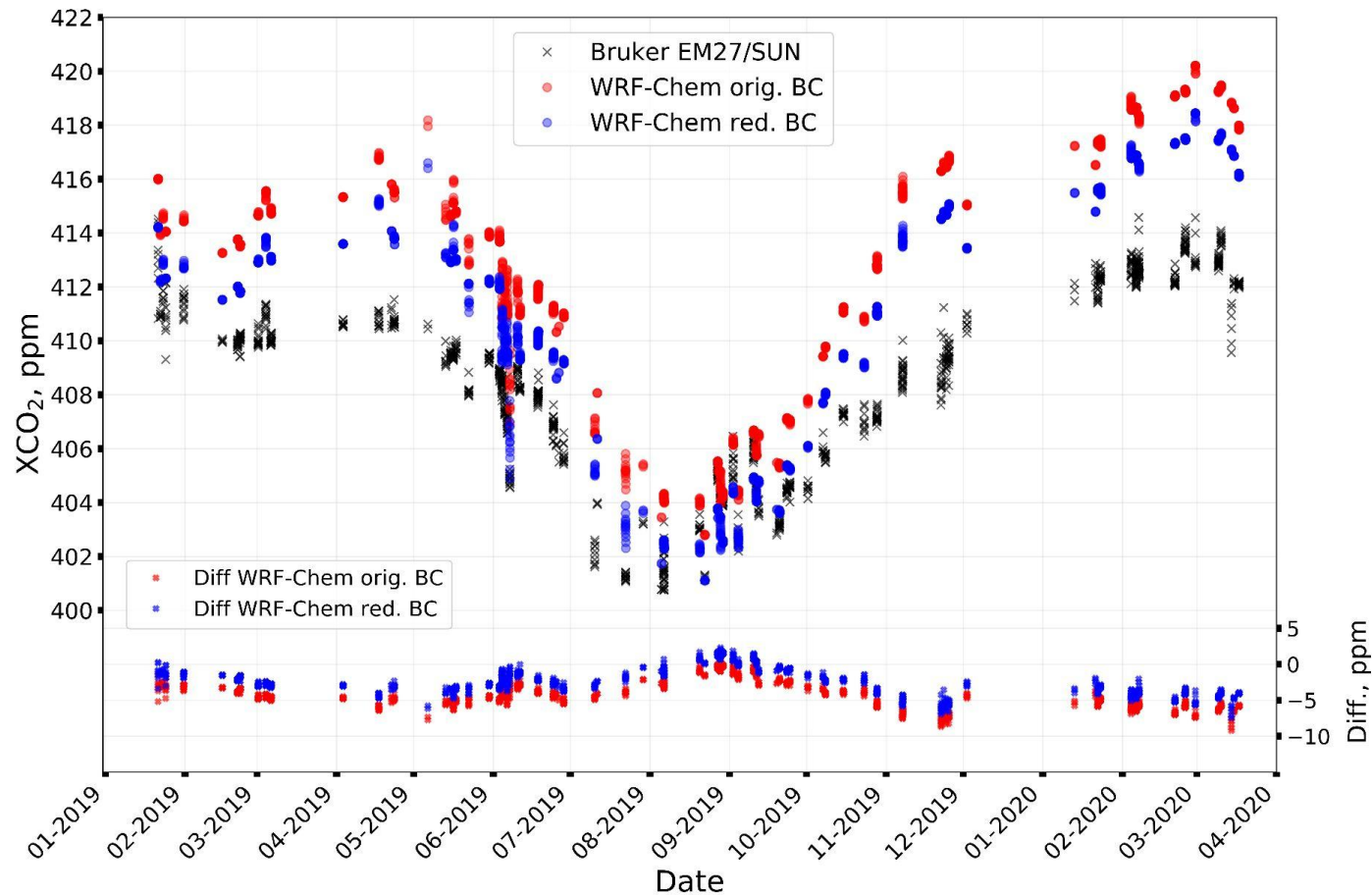
[Timofeev et al. 2018]

Минус:

- практически отсутствие измерений для северных регионов России (в том числе из-за облачности)

3D численное моделирование переноса CO₂ в атмосфере в районе Санкт-Петербурга

Временной ряд среднего отношения смеси CO₂ во всей атмосфере (XCO₂) в районе Санкт-Петербурга за 01.2019-03.2020 по данным наземных спектроскопических измерений и моделировании WRF-Chem



Плюс:

- нет пропусков как во времени, так и в пространстве

Минус:

- требует комплексной валидации с помощью измерений содержания CO₂ и параметров атмосферы

Реализация дифференциального спектроскопического (ДС) метода для определения антропогенных эмиссий парниковых газов (на примере CO_2)

Emission Monitoring Mobile Experiment (EMME)

- В 2019 и 2020 г. в Санкт-Петербурге на базе СПбГУ проводилась уникальная для России измерительная кампания EMME [Makarova et al., 2021; Ionov et al., 2021; Alberty et al., 2022]
- В кампании приняли участие ученые четырех организаций - СПбГУ, ГГО им. Воейково (Россия), Технологического института Карлсруэ и Бременского университета (Германия)
- При измерениях в 2019 г. использовалось 2 мобильных взаимокалиброванных ИК Фурье-спектрометра Bruker EM27/SUN с систематической погрешностью измерений ОС CO_2 порядка 0.02% [Makarova et al., 2021]
- В марте-апреле 2019 г. проведено 11 дней тщательно спланированных измерений

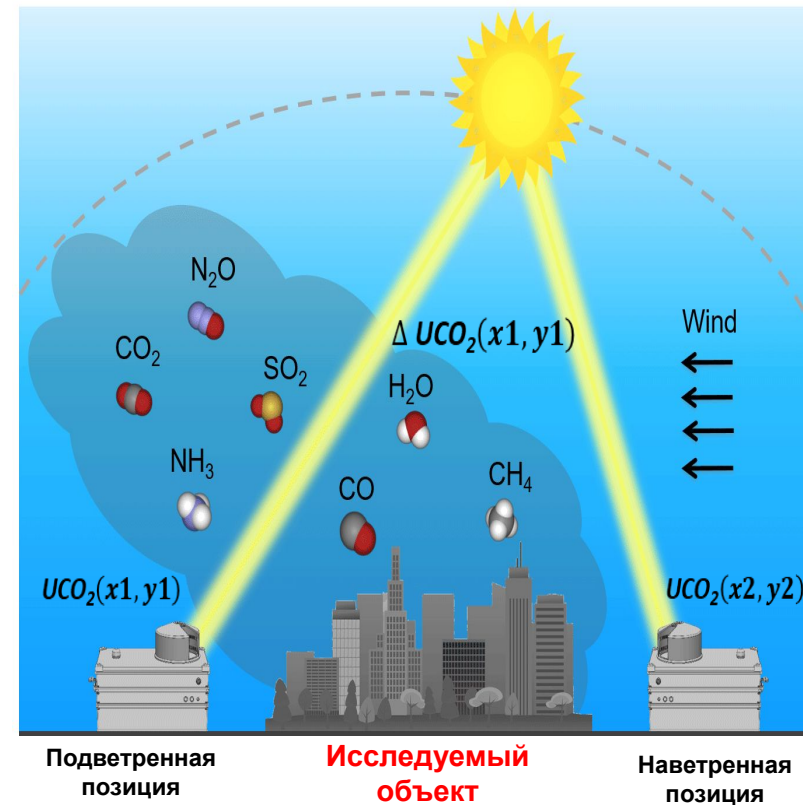


Схема ДС метода определения антропогенного вклада города

Оригинал: [Dietrich et al., 2021]

Оценки антропогенных эмиссий CO₂ со всей территории Санкт-Петербурга

Инвентаризационный метод

- ❑ Администрация города ~**30 Мт/год (2015 г.)**
- ❑ Инвентаризация ODIAC
31 Мт/год (2018 г.)
49 Мт/год (2019 г., изменения на 60%)

На основе дифференциальных спектроскопических (ДС) дистанционных измерений общего содержания газа (кампания EMME в 2019-2020 гг.)

- ❑ Решение обратной задачи атмосферного переноса с помощью измерений программы EMME, боксовой и дисперсионной модели HYSPLIT - **65-75 Мт/год (2019 г.)**
[Тимофеев Ю.М. и др., 2020, 2022, Ionov et al. 2021]
- ❑ Решение обратной задачи атмосферного переноса с помощью измерений программы EMME и численной модели WRF-Chem - **62±21 Мт/год (2019 г.)**

Заключение - проблемы и задачи

1. Необходимо создание российской спутниковой, самолетной и наземной **аппаратуры** для независимого определения антропогенных эмиссий климатически важных (КВ) газов и возможности **заменить недоступные** в данный момент **иностранные приборы**. Отсутствие аппаратуры ограничивает возможности получения независимых и достоверных оценок эмиссий и стоков КВ газов на территории России.

2. Необходимо создать **сеть наземных** измерительных станций для **регулярного** мониторинга содержания КВ газов во **всей атмосфере** (в том числе проведение мобильных измерений) для **валидации инвентаризаций эмиссий** и **спутниковых измерений КВ газов**.

3. Необходима **разработка** методик, алгоритмов, априорной информации и программного обеспечения для решения комплексной обратной задачи дистанционного определения антропогенных эмиссий парниковых газов по данным спутниковых и наземных измерений.

Спасибо за внимание!

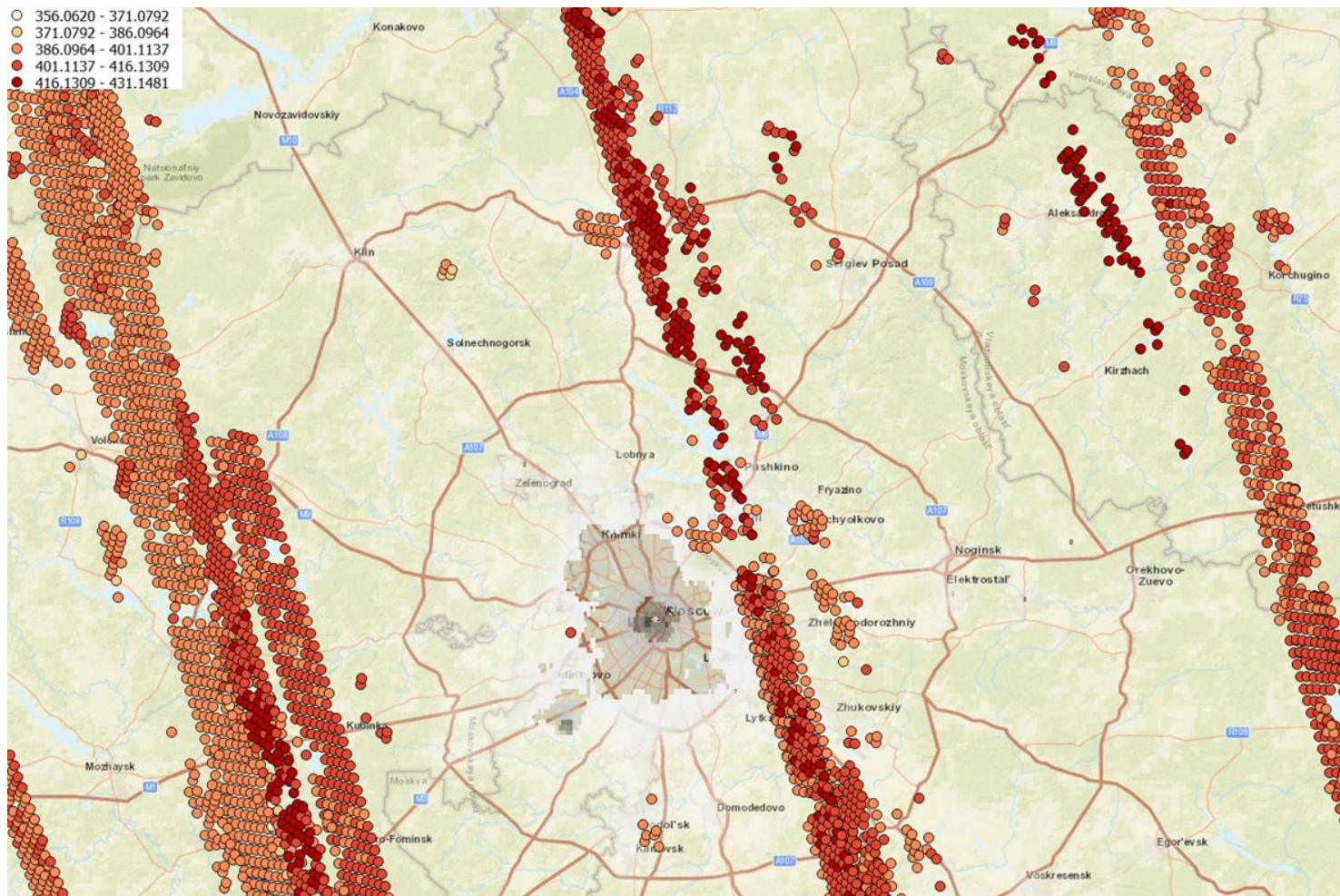
Thank you for attention!



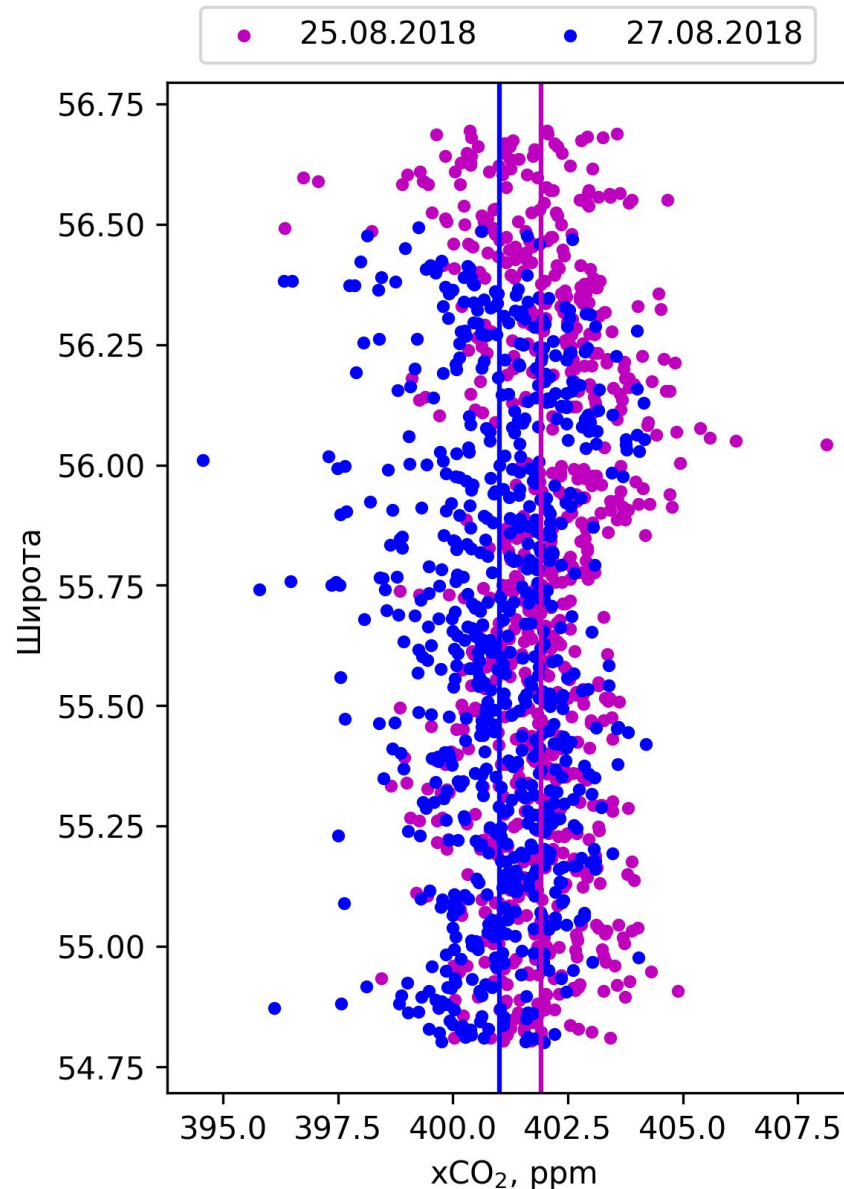
<https://o3lab.spbu.ru/>
<http://troll.phys.spbu.ru/>



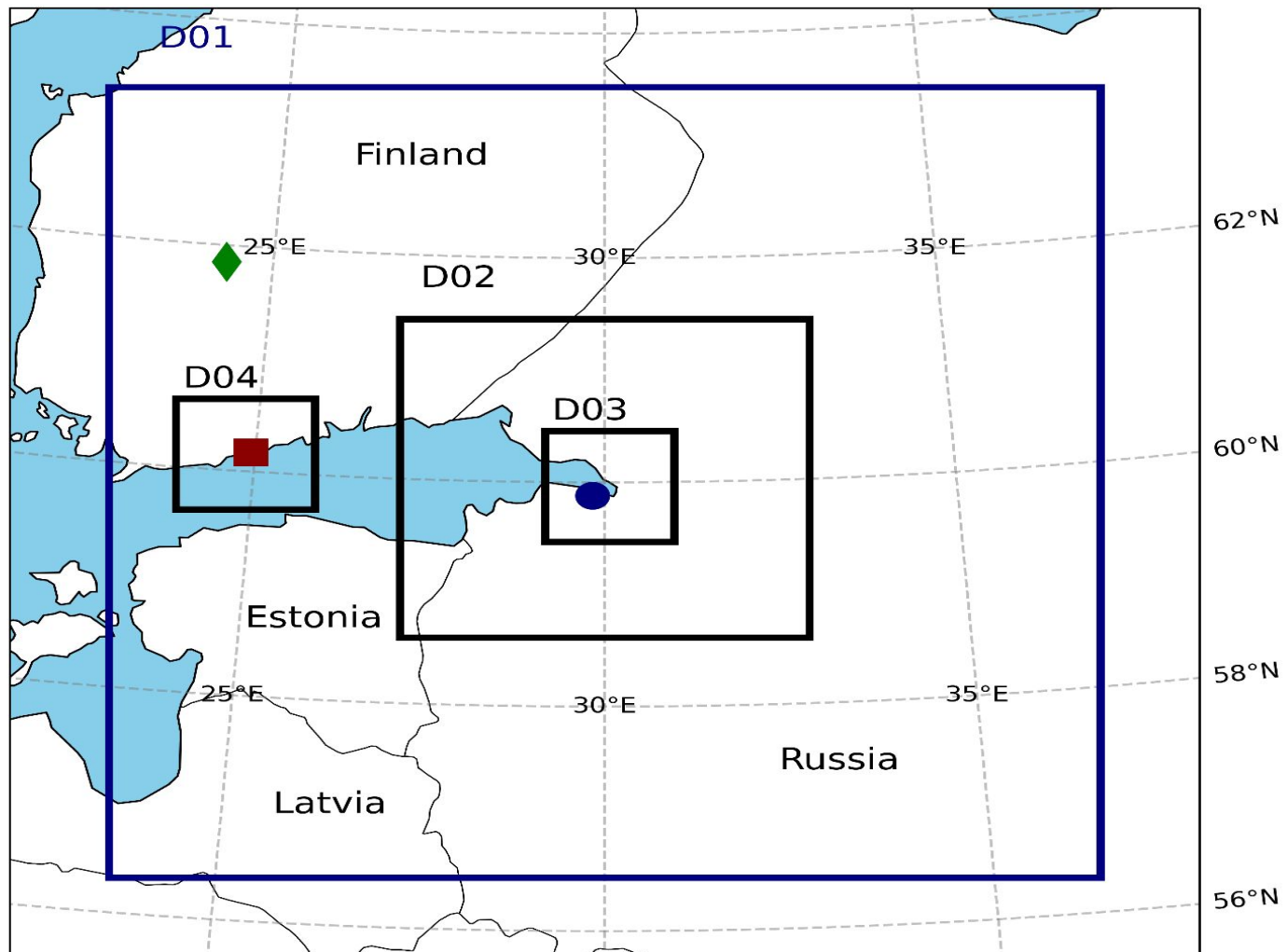
Спутниковые измерения ОСО-2 ХСО₂ в районе Москвы



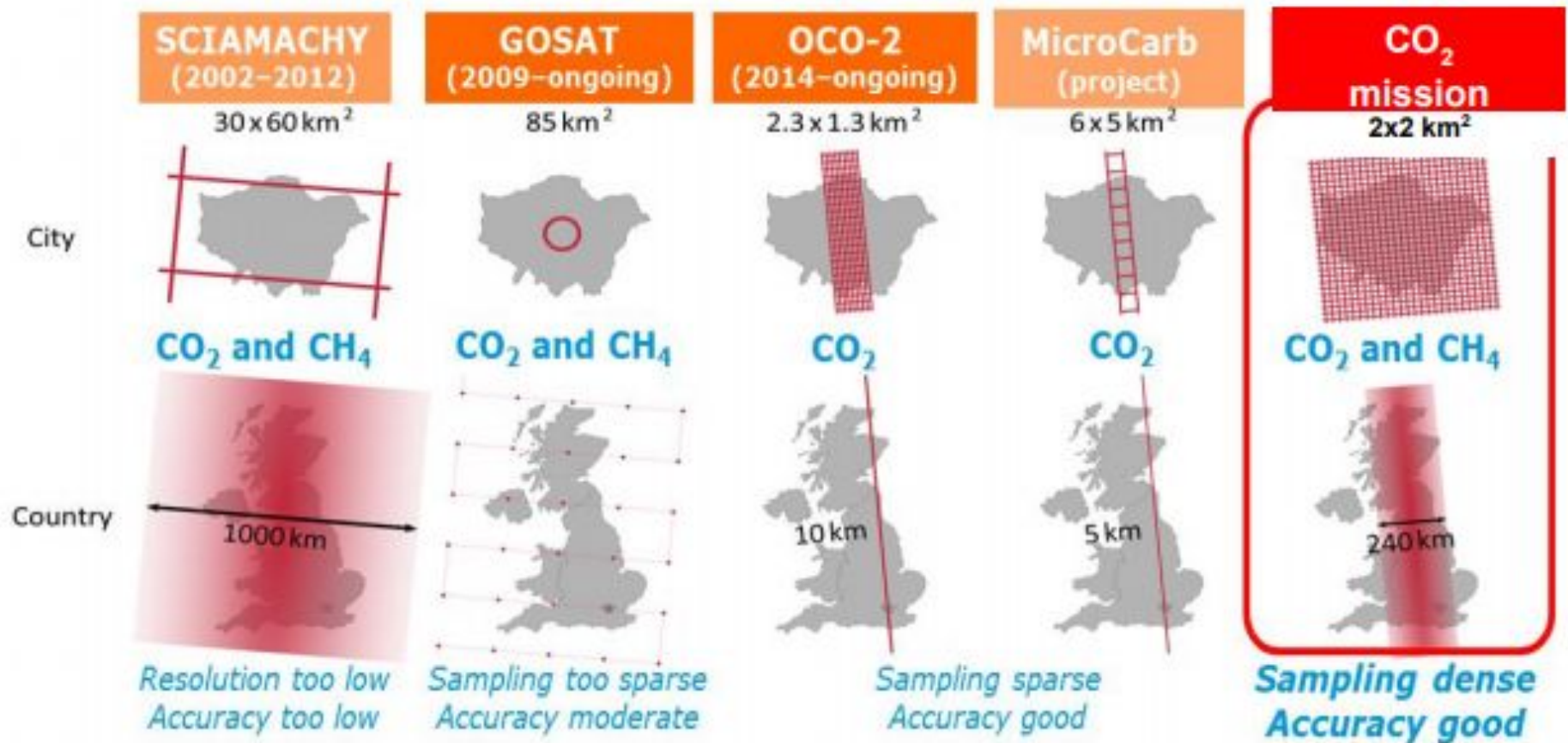
Два дня измерений XCO₂ вблизи Москвы (прибор ОСО-2)



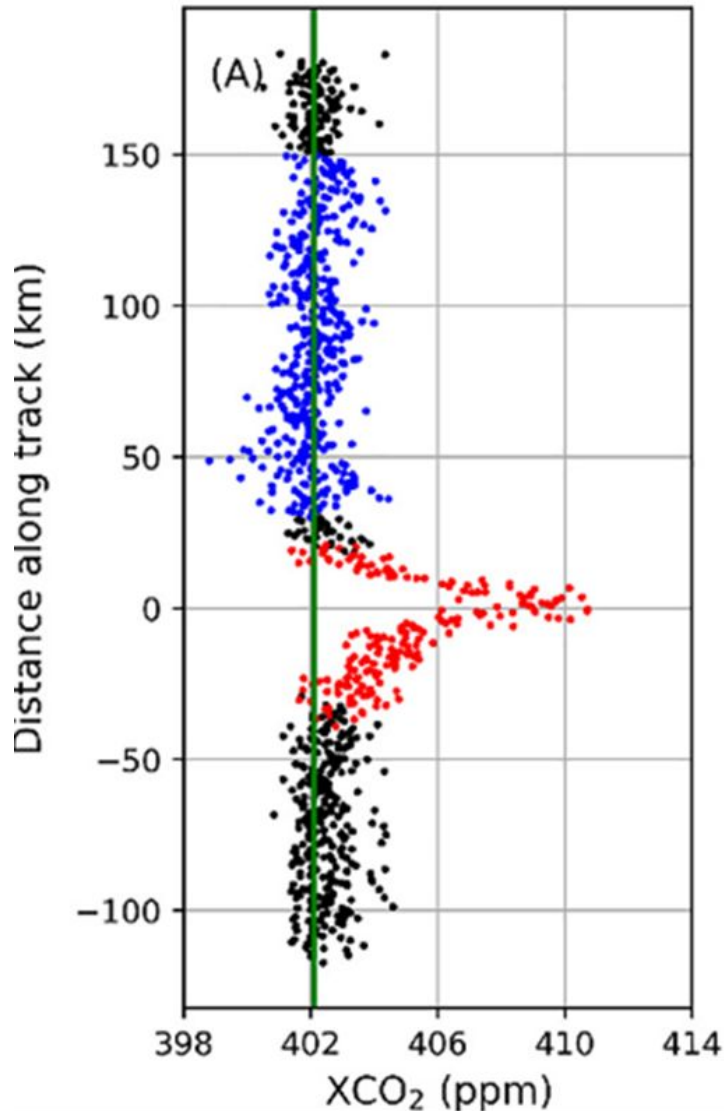
Области моделирования WRF-Chem



Comparison of the spatial resolution and coverage of SCIAMACHY, GOSAT, OCO-2, MircoCarb and the considered Copernicus CO₂ monitoring mission.



Антропогенные эмиссии в районе Липецка (508 000 человек), измерения ОСО-2



Антропогенные эмиссии
 69 ± 50 MtCO₂/год,
(189 ± 137 ktCO₂/день)

Reuter et al., 2019

Станция наблюдений (валидации) CO₂ в Мюнхене

