



ПЯТНАДЦАТЬ ЛЕТ FTIR - ИЗМЕРЕНИЙ ГАЗОВОГО СОСТАВА АТМОСФЕРЫ В СПБГУ

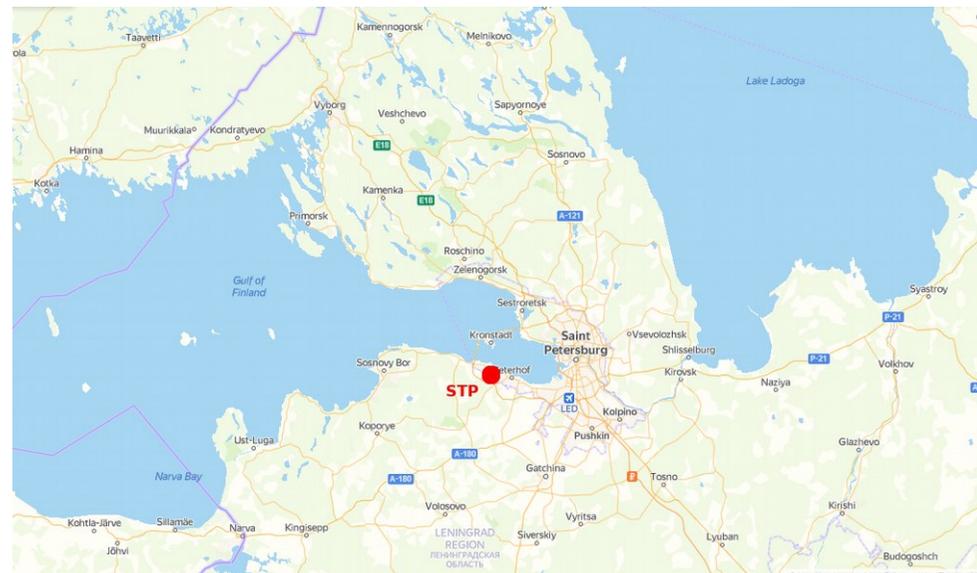
Макарова М.В. (m.makarova@spbu.ru),
Ионов Д.В., Поберовский А.В., Поляков А.В.,
Имхасин Х.Х., Косцов В.С., Фока С.Ч.

Станция атмосферного мониторинга СПбГУ

Измерительная станция (Saint Petersburg, STP) расположена в 35 км к юго-западу от центра Санкт-Петербурга, $59,88^{\circ}$ с.ш., $29,83^{\circ}$ в.д., 20-30 м над уровнем моря. Аппаратура размещена в зданиях физического факультета и НИИФ СПбГУ (РЦ «Геомодель»).

Основное оборудование для исследований газового состава атмосферы:

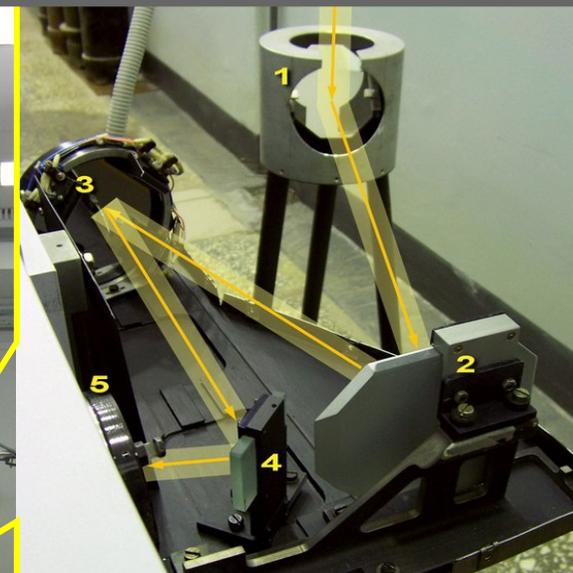
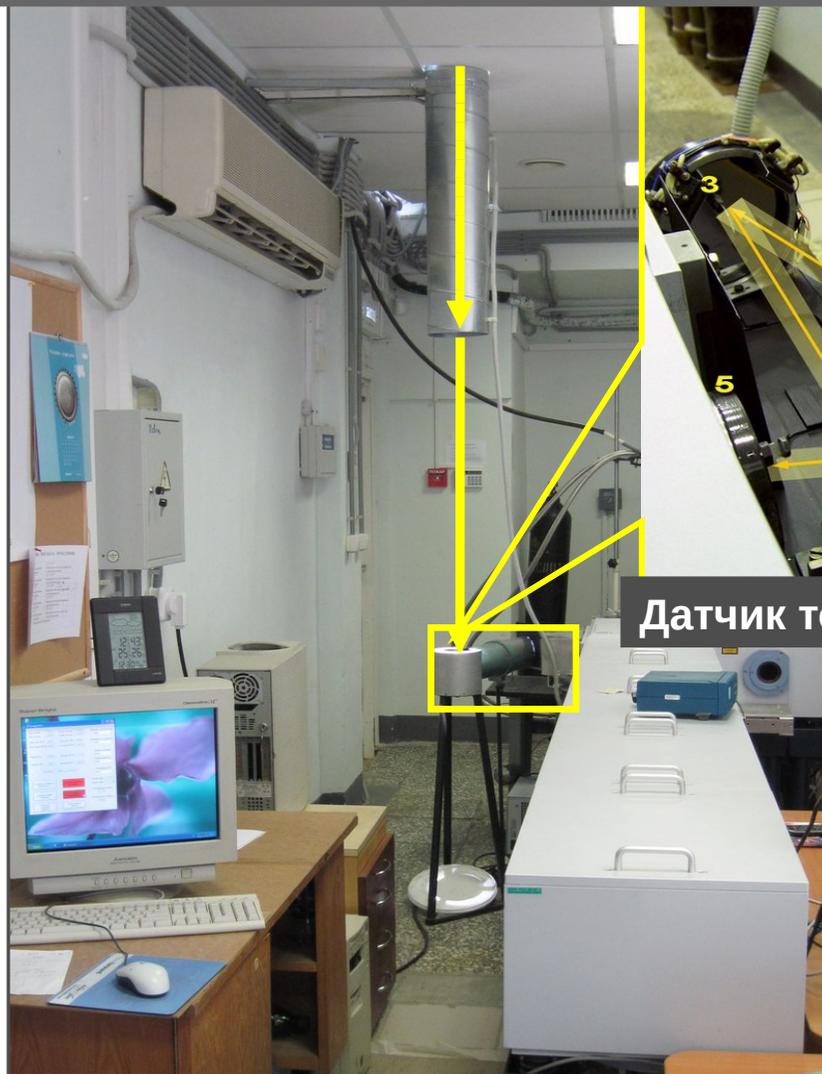
- **Фурье-спектрометр (FTIR spectrometer) Bruker IFS 125HR;**
- спектрометры OceanOptics HR4000-UV, HR4000-VIS;
- микроволновый радиометр RPG-HATPRO;
- комплекс газоанализаторов Los Gatos Research и ThermoScientific.



Стационарный измерительный FTIR-комплекс



Наземные FTIR-измерения прямого ИК солнечного излучения

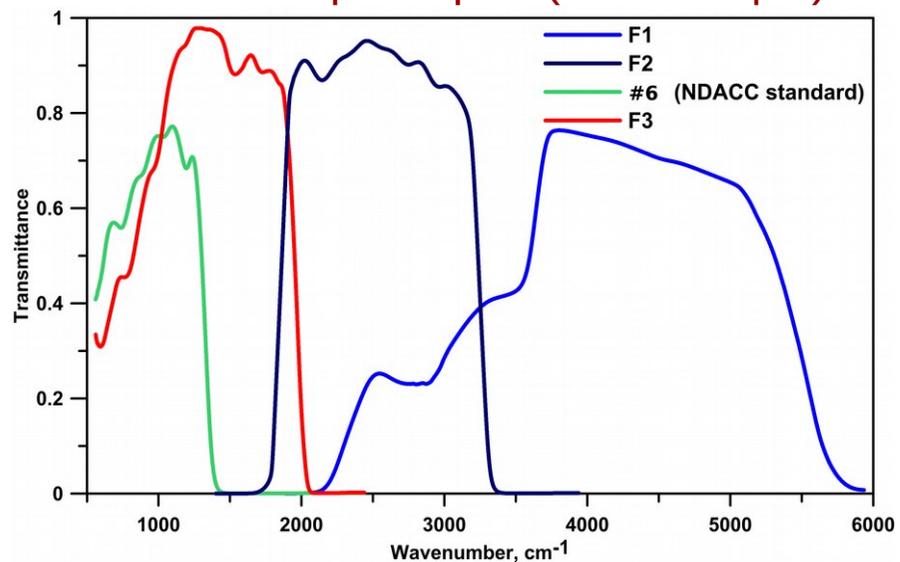


Датчик точного наведения

Фурье-спектрометр
Bruker IFS 125HR
+
солнечная
следящая система
(2009 – 2023 гг.)

Характеристики FTIR-комплекса

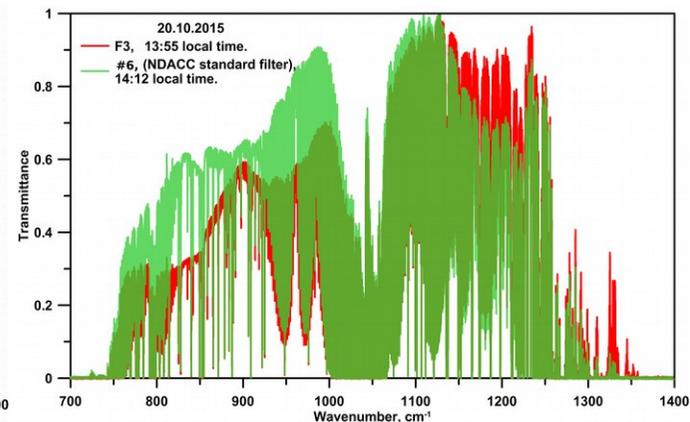
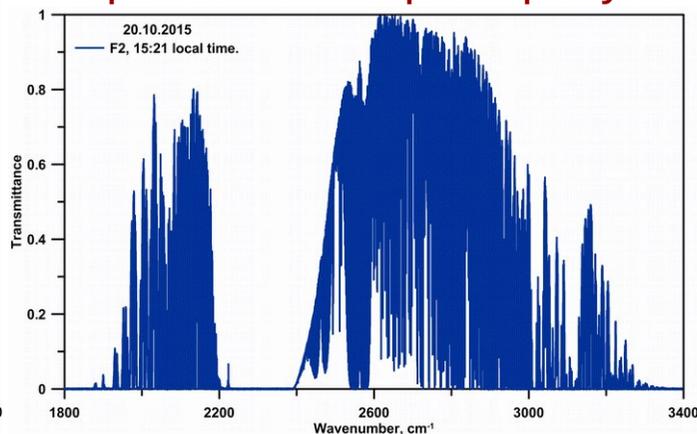
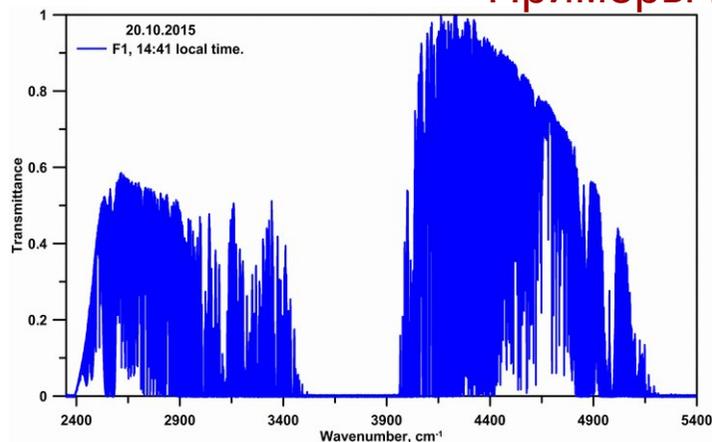
Пропускание используемых оптических фильтров (огибающая)



Типичные характеристики (ФС Bruker IFS 125HR) при ИК измерениях прямого солнечного излучения

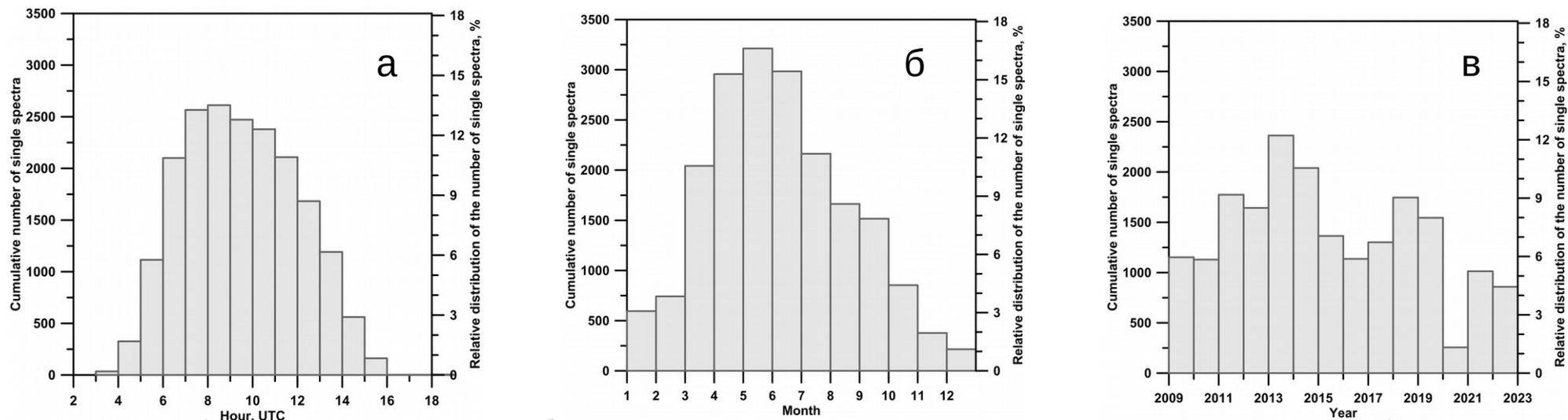
	Оптический фильтр			
	F1	F2	F3*	#6**
Приемник излучения	LN-cooled InSb		LN-cooled MCT	
Делитель	KBr			
Апертура, мм	0.8 – 1.3		2.0 – 2.5	
Спектр. разрешение, см ⁻¹ (оптич. разность хода, см)	0.005 (180)			
Регистрируемый диапазон, см ⁻¹	2350 – 5400	1700 – 3400	650 - 1400	
Количество сканов	4-10		6-10	

Примеры измеренных спектров пропускания атмосферы



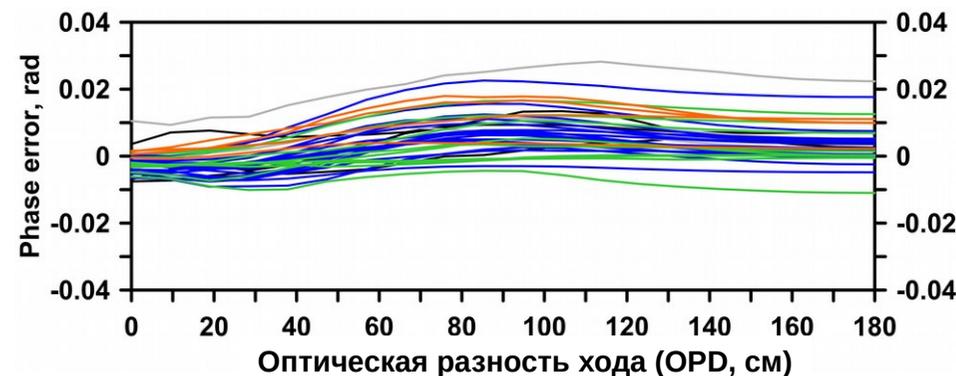
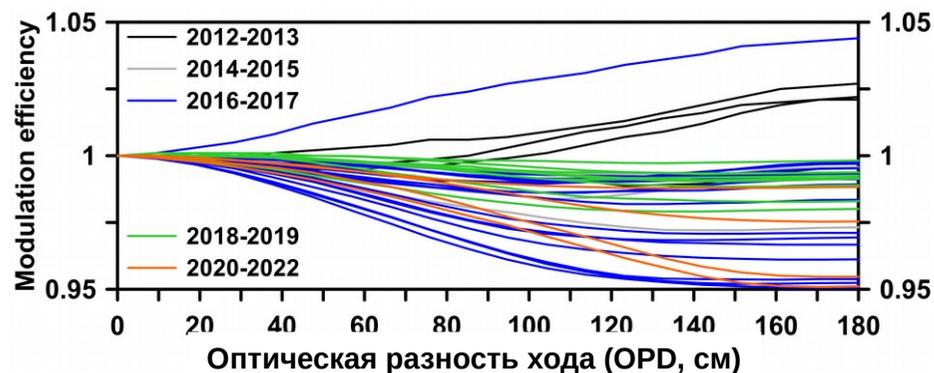
“Количество и качество” FTIR-измерений

Суточное (а), месячное (б) и годовое (в) распределение суммарного числа спектров за 2009-2022гг.



Верхние три графика: левая ось Y показывает абсолютное количество спектров; правая ось Y – относительное значение в % (нормализованное к суммарному числу спектров за 2009-2022гг.).

Контроль юстировки ФС Bruker IFS 125HR с использованием HBr-кюветы: определение эффективности модуляции (Modulation efficiency) и фазовой ошибки (Phase error)



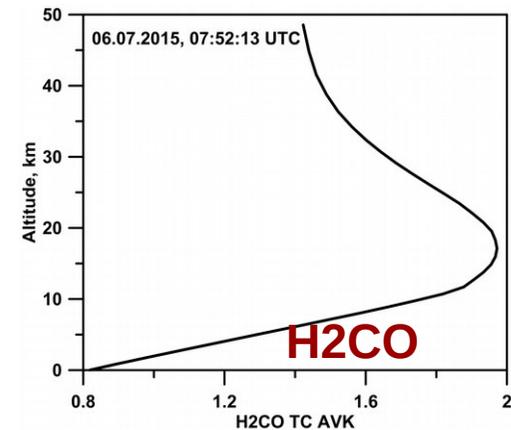
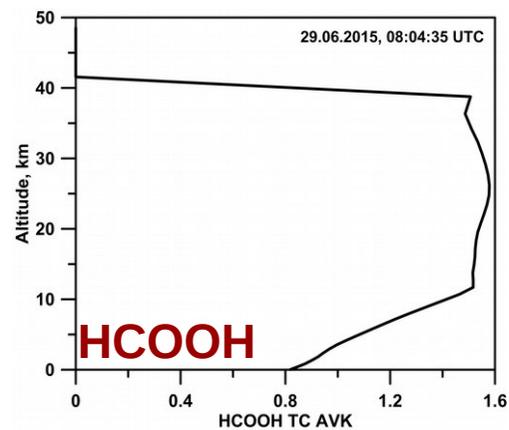
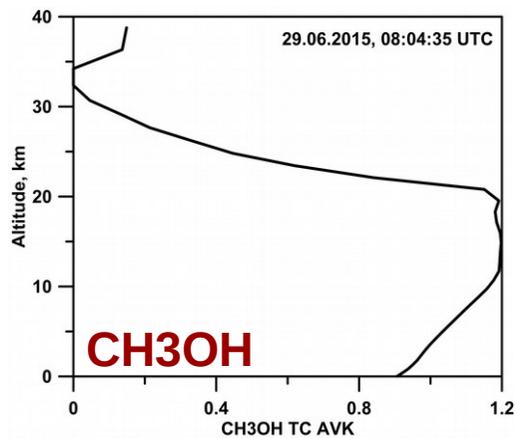
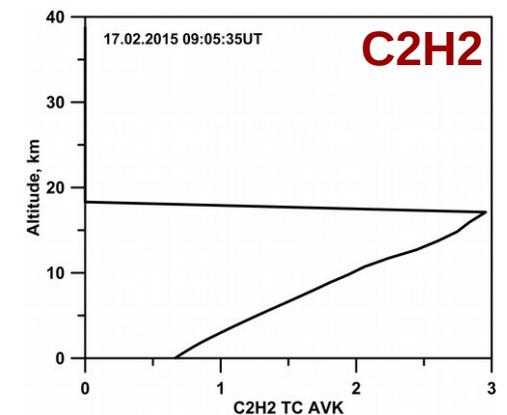
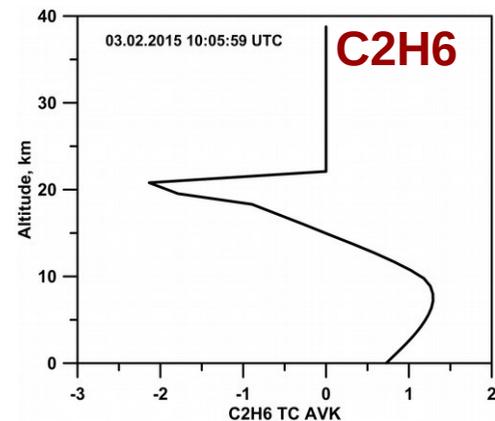
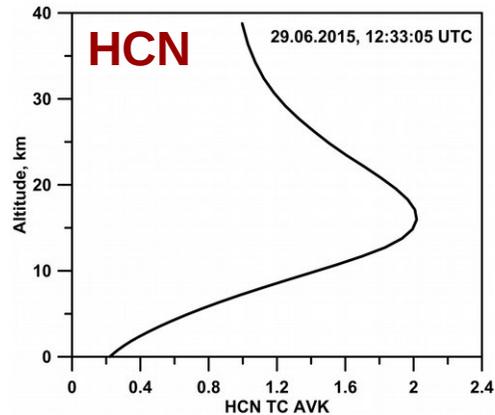
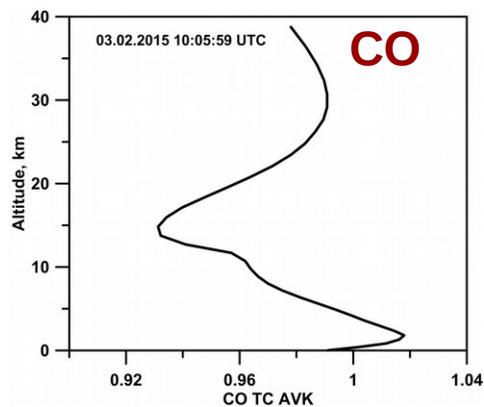
FTIR-мониторинг газового состава: методики и результаты (1)

Список измеряемых газов: CH₄, N₂O, CO₂, SF₆, CO, HCN, C₂H₆, H₂O, HCl, HF, O₃, HNO₃, ClONO₂, CFC-11, CFC-12, HCFC-22, H₂CO, CH₃OH, HCOOH, C₂H₂, OCS, NH₃, NO₂, N₂

	Спектральные интервалы, см ⁻¹	Мешающие газы, тип регуляризации (OE – стат.регуляризация, T-P – регуляризация Тихонова-Филлипса, PO)	Среднее TC _{ср} , молек/см ²	Среднее X _{GAS} , parts per volume	Degrees of freedom for signal (DOFS)	Погрешность	
						Случ., %	Сист., %
CH ₄	2613.70 – 2615.40 2835.50 – 2835.80 2921.00 – 2921.60	H ₂ O, CO ₂ , NO ₂ T-P, SFIT4	3.887·10 ¹⁹	1.809 ppmv	2.54	1.5	3.6
OCS	2030.75 – 2031.06 2047.85 – 2048.24 2049.77 – 2050.18 2051.18 – 2051.46 2054.33 – 2054.67	CO ₂ , O ₃ , CO, ¹⁶ O ¹² C ¹⁸ O, H ₂ ¹⁶ O, H ₂ ¹⁸ O OE, SFIT4	9.474·10 ¹⁵	440.8 pptv	2.52	1.7	3.4
CO	2057.70 – 2058.00 2069.56 – 2069.76 2157.50 – 2159.15	O ₃ , N ₂ O, H ₂ O, OCS, CO ₂ OE, SFIT4	2.042·10 ¹⁸	95.01 ppbv	2.61	1.9	3.0
HCN	3268.05 – 3268.35 3331.40 – 3331.80	CO ₂ , H ₂ O, N ₂ O, H ₂ ¹⁷ O, H ₂ ¹⁸ O OE, SFIT4	5.457·10 ¹⁵	254.1 pptv	1.40	15	5.4
C ₂ H ₆	2976.66 – 2976.95 2983.20 – 2983.55	H ₂ O, O ₃ , CH ₄ , CH ₃ Cl OE	2.289·10 ¹⁶	1.064 ppbv	1.27	3.4	4.6
C ₂ H ₂	3250.25 – 3251.11	H ₂ O, H ₂ ¹⁸ O T-P, SFIT4	3.510·10 ¹⁵	163.0 pptv	1.50	36	6.6
CH ₃ OH	992.00 – 998.70 1029.00 – 1037.00	O ₃ , O ₃ ⁶⁸⁶ , O ₃ ⁶⁶⁸ , O ₃ ⁶⁷⁶ , O ₃ ⁶⁶⁷ , H ₂ O, CO ₂ T-P, SFIT4	2.13810 ¹⁶	996.4 pptv	1.00	27	26

FTIR-мониторинг газового состава: методики и результаты (2)

Чувствительность (ТС AVK) - типичные примеры для некоторых газов:
CO, HCN, C₂H₆, H₂CO, CH₃OH, HCOOH, C₂H₂



FTIR-мониторинг газового состава: методики и результаты (3)

Анализ трендов общего содержания (ТС) газов по данным FTIR-измерений и результатам расчетов ХКМ ЕМАС (KIT): 2009 – 2020 годы

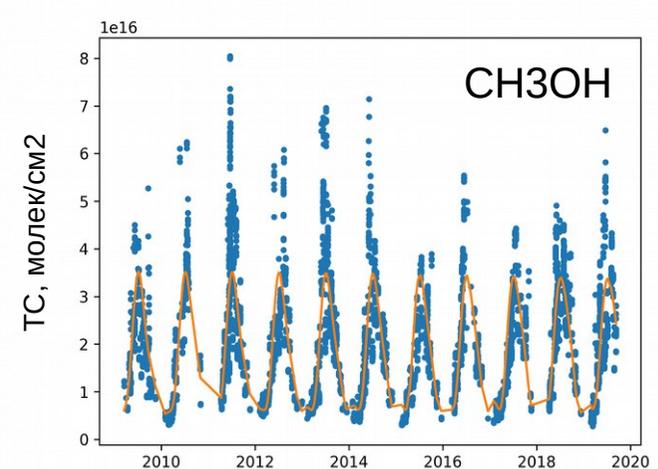
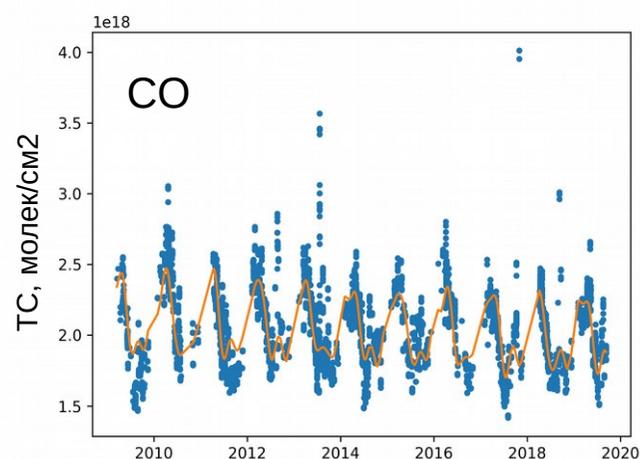
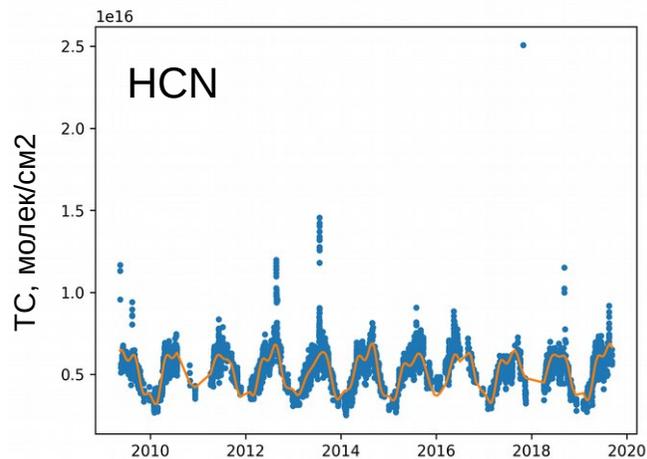
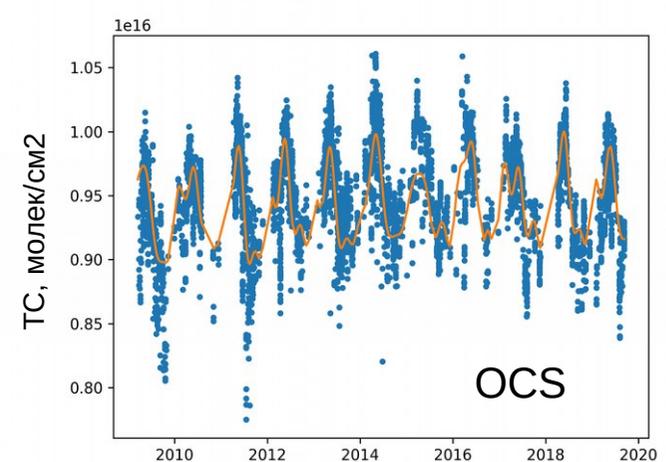
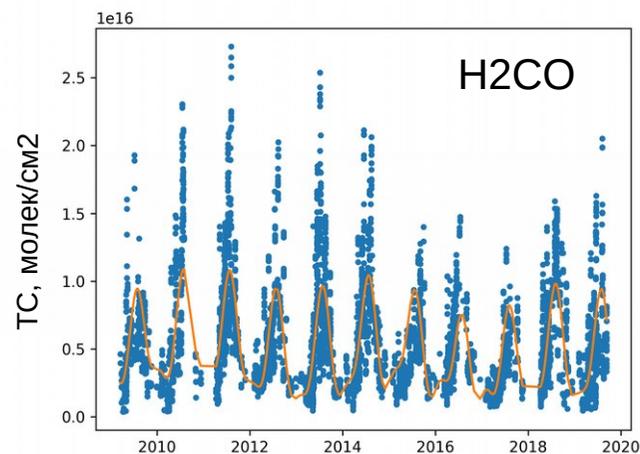
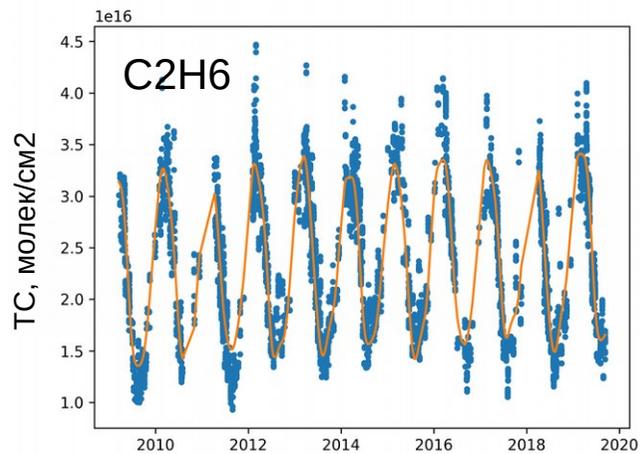
Алгоритм: неравномерные ряды ТС ► гармонический анализ методом Ломба-Скарля ► метод кросс-валидации для определения количества значимых гармоник N ► МНК – аппроксимация ряда функцией = (линейный тренд + N гармоник) ► оценка погрешности линейного тренда методом бутстрэппинга (Монте-Карло).

Газ	Значение тренда $\pm \sigma$, % в год	
	FTIR	EMAC
CO ₂	0.58 \pm 0.01	0.51 \pm 0.01
CH ₄	0.39 \pm 0.01	0.16 \pm 0.01
N ₂ O	0.26 \pm 0.01	0.20 \pm 0.01
OCS	0.16 \pm 0.05	–
CO	-0.69 \pm 0.08	-0.26 \pm 0.04
HCN	0.08 \pm 0.19	–

Газ	Значение тренда $\pm \sigma$, % в год	
	FTIR	EMAC
–		
C ₂ H ₆	1.02 \pm 0.14	-0.21 \pm 0.04
H ₂ CO	-3.1 \pm 0.5	-0.50 \pm 0.26
CH ₃ OH	0.26 \pm 0.24	-0.13 \pm 0.11
HCOOH	-1.14 \pm 0.37	-0.44 \pm 0.33
C ₂ H ₂	-2.8 \pm 0.3	–
NO ₂	1.91 \pm 0.12	-0.18 \pm 0.10

FTIR-мониторинг газового состава: методики и результаты (4)

Результаты FTIR-измерений газового состава на станции атмосферного мониторинга СПбГУ (на примере C_2H_6 , H_2CO , OCS , HCN , CO и CH_3OH).



Трехлетняя мобильная измерительная кампания ЕММЕ* 2019-2021

Основная цель:

- ▶ Осуществить экспериментальную оценку эмиссии CO_2 , CH_4 , CO and NO_2 с территории Санкт-Петербурга

Организаторы и участники ЕММЕ 2019-2021:

СПбГУ



KIT



UoB



- ▶ Мобильные эксперименты проводились: в марте – апреле 2019 (11 дней); в марте – начале мая 2020 (3 дня до карантина *COVID-19* и 3 дня во время карантина); в апреле 2021 (4 дня – дневные и ночные измерения).

* *EMME* \equiv *Emission Monitoring Mobile Experiment*

Санкт-Петербургская агломерация

Мегаполигон для тестирования технологий, физико-математических методов и моделей по оценке эмиссий и потоков:



- второй по численности населения город России и четвертый в Европе;

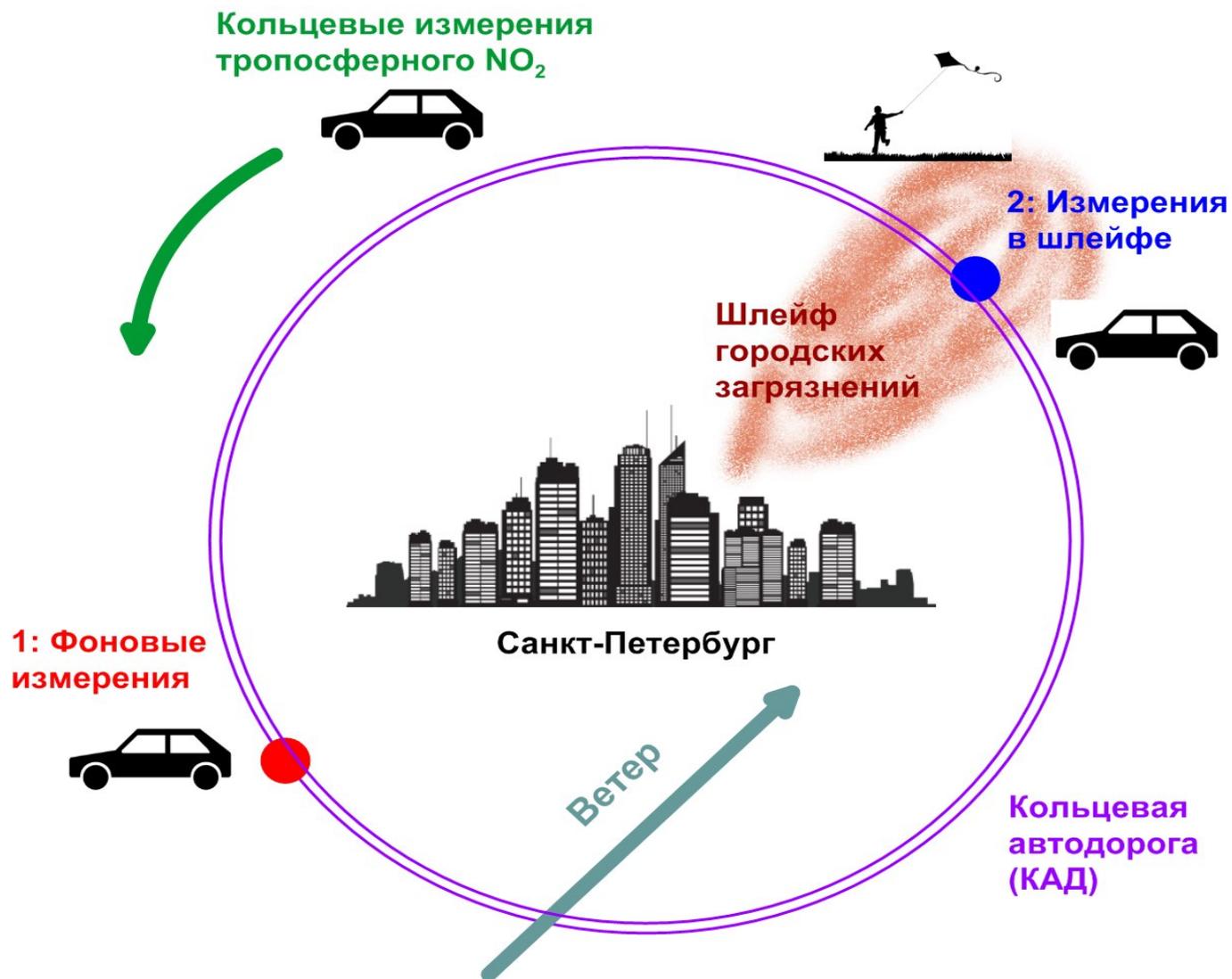
- данные о численности населения: 5.4* - 7** млн человек.

* - по официальным данным;

** - по неофициальным данным.

- наличие источников различного вида и интенсивности;
- большая номенклатура загрязнителей;
- сложная структура объекта (прибрежное расположение, плотная застройка).

Схема мобильного эксперимента



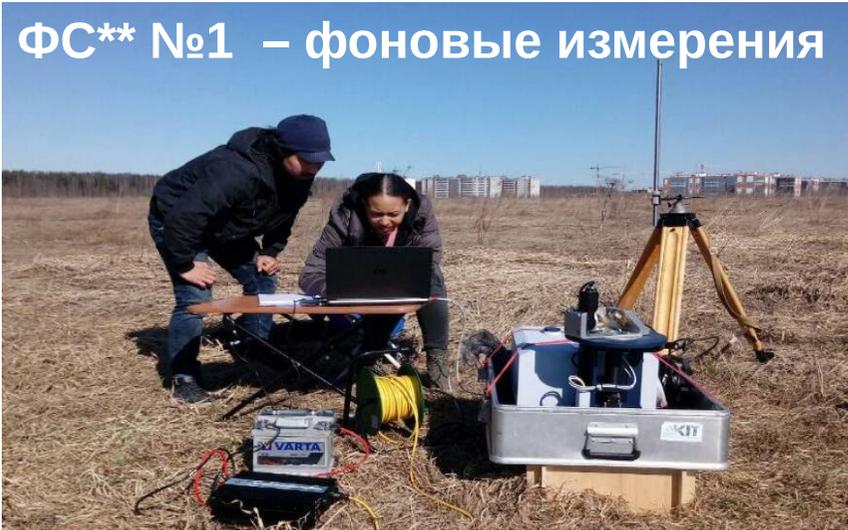
Измерительная аппаратура ЕММЕ

- ▶ **два портативных Фурье-спектрометра** (ФС) Bruker EM27/SUN для измерения содержания CO_2 , CH_4 и CO во всей толще атмосферы;
- ▶ **дифракционный спектрометр** OceanOptics для мобильных измерений содержания NO_2 в тропосфере;
- ▶ **GPS приемники** – информация о географическом местоположении аппаратуры;
- ▶ **устройства и пакеты для отбора проб воздуха - для дальнейшего анализа концентраций** CO_2 , CH_4 , CO , N_2O , H_2O , NO_2 , NO и O_3 в атмосферном воздухе;
- ▶ **воздушный змей большой площади** для отбора проб воздуха на высоте (50-100 м);
- ▶ **метеостанция** для проведения метеорологических наблюдений;
- ▶ **3 легковых автомобиля** – для транспортировки измерительной аппаратуры.

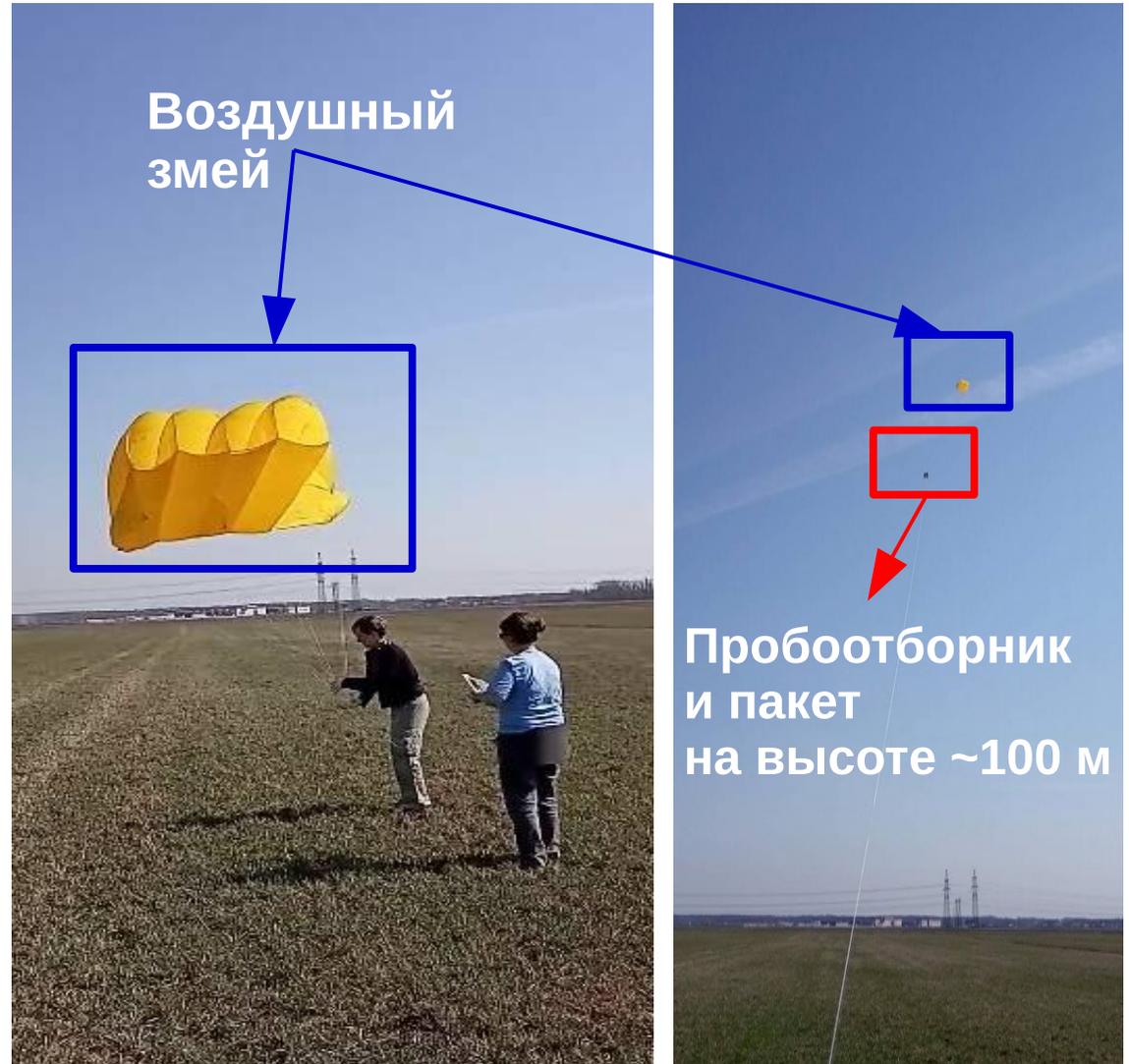
Концепция ЕММЕ (1)

► мобильный эксперимент – комплексный подход

ФС** №1 – фоновые измерения



ФС №2 – измерения в шлейфе

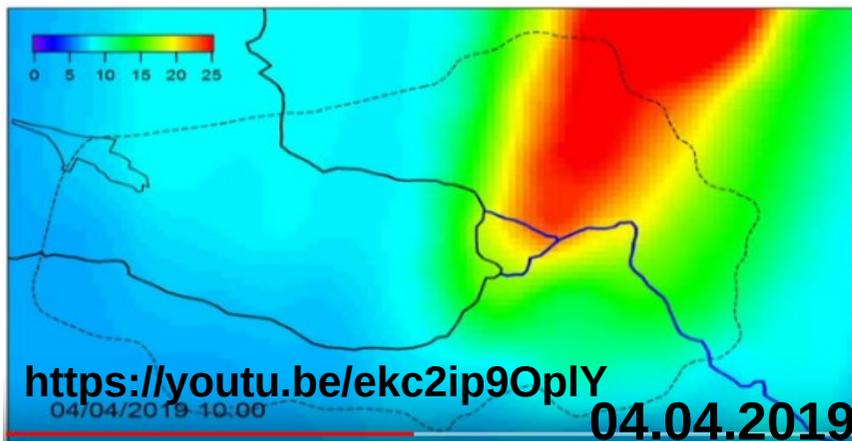


Концепция ЕММЕ (2)

▶ подготовительный этап (конец 2018 – начало 2019)

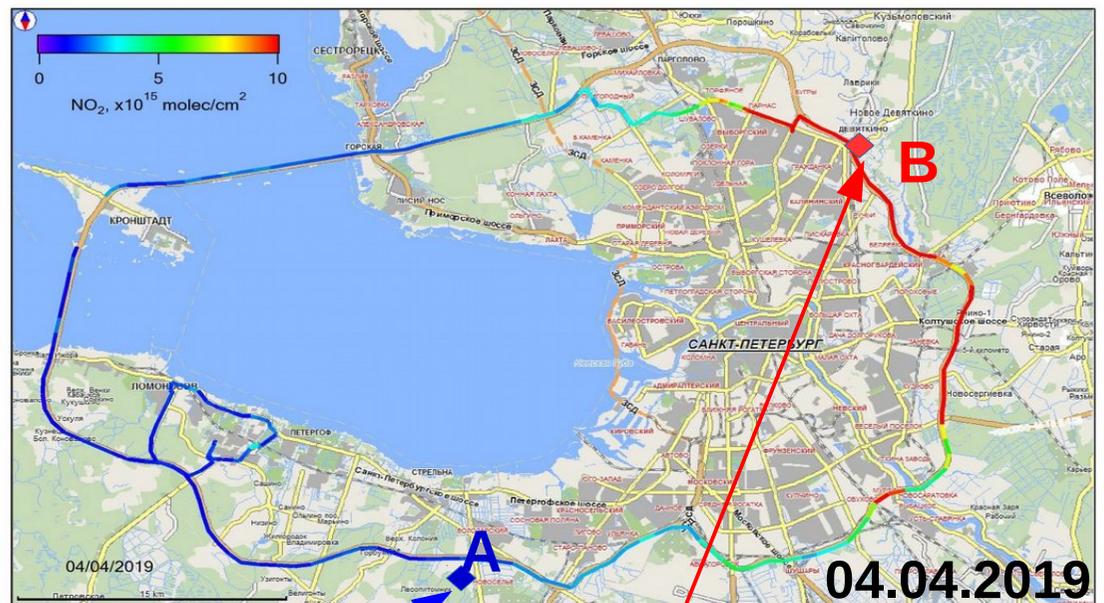
Выбрана 21 точка по периметру кольцевой автодороги Санкт-Петербурга для проведения наветренных и подветренных измерений общего содержания CO_2 , CH_4 и CO с использованием портативных Фурье-спектрометров.

▶▶ за 12 часов до



Распространение шлейфа NO_2 прогнозировалось с помощью дисперсионной модели HYSPLIT. Прогноз позволял предварительно определить положение наветренной и подветренной измерительных точек для Фурье-спектрометров.

▶▶▶ мобильный мониторинг положения городского шлейфа (NO_2) в реальном времени

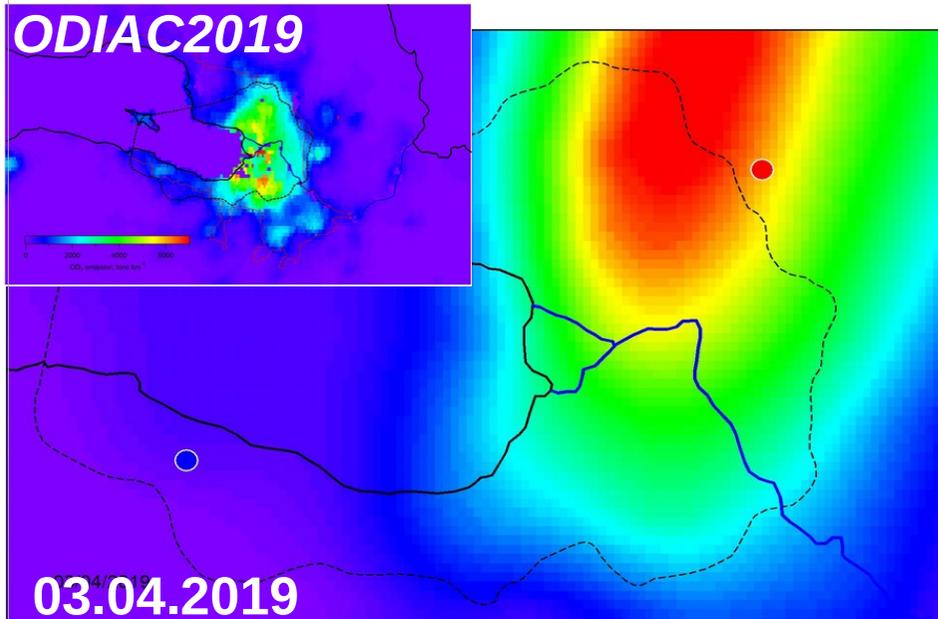


Расположение Фурье-спектрометров:
№1 (точка А) и **№2 (точка В)**

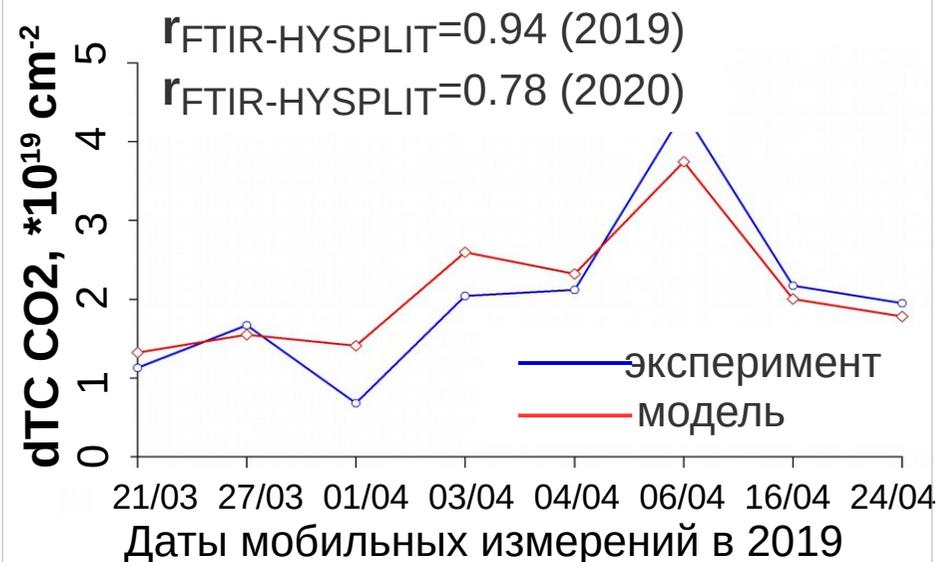
Интегральная эмиссия CO₂ для Санкт-Петербурга

► Совместный анализ данных измерительной кампании EMME 2019-2020 и результатов моделирования

Априорная информация об эмиссиях CO₂:
база данных ODIAC



Антропогенная добавка CO₂



► ► Интегральная эмиссия CO₂ для Санкт-Петербурга, кт/год:

2019 - 75800±5400

2020 - 68400±7100 (~10% ниже чем для 2019г.)

Заключение

- ▶ В СПбГУ накоплен значительный опыт:
 - проведения стационарного и мобильного FTIR-мониторинга климатически и экологически важных газов на территории Санкт-Петербургской агломерации;
 - моделирования и прогноза газового состава атмосферы.
- ▶ Результаты исследований используются:
 - для изучения изменчивости содержания газов в атмосфере различного временного масштаба;
 - для валидации спутниковых измерений газового состава атмосферы;
 - для «top-down» оценок выбросов крупных городов;
 - для идентификации и классификации мощных антропогенных (нефте- и газодобывающие предприятия, ТЭЦ, полигоны ТБО, и др.) и естественных (лесные и торфяные пожары) источников загрязнений;
 - для верификации кадастровых оценок эмиссий;
 - для моделирования/прогноза качества атмосферного воздуха.

► ССЫЛКИ:

Makarova M. V., et al.: Emission Monitoring Mobile Experiment (EMME): an overview and first results of the St. Petersburg megacity campaign 2019, *Atmos. Meas. Tech.*, **14**, 1047–1073, <https://doi.org/10.5194/amt-14-1047-2021>, 2021.

Ionov, D. V., et al.: The CO₂ integral emission by the megacity of St Petersburg as quantified from ground-based FTIR measurements combined with dispersion modelling, *Atmos. Chem. Phys.*, **21**, 10939–10963, <https://doi.org/10.5194/acp-21-10939-2021>, 2021.

Draxler, R. R. and Hess, G.D.: An overview of the HYSPLIT₄ modelling system for trajectories, dispersion, and deposition. *Aust. Meteor. Mag.*, **47**, 295-308, 1998.

Serebriisky, I.A., (Ed.): The Report on Environmental Conditions in St. Petersburg for 2017, https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2018/06/29/Doklad_EKOLOGIA2018.pdf, 2018 (in Russian).

Oda, T. and Maksyutov, S. (2015), ODIAC Fossil Fuel CO₂ Emissions Dataset (Version name: ODIAC2019), Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, doi:10.17595/20170411.001.18).

► Благодарности:

При проведении стационарных и мобильных измерений было задействовано оборудование Научного парка СПбГУ (РЦ “Геомодель”).

Авторы благодарят: NOAA ARL за предоставление атмосферной транспортной дисперсионной модели HYSPLIT и/или ресурсов web-сайта READY (<http://www.ready.noaa.gov>), которые использовались в подготовке публикаций; KIT и лично Оливера Кирнера за предоставление результатов ХКМ ЕМАС.