

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева
Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН)

Лаборатория мониторинга парниковых газов атмосферы

**Развитие лидарных методов измерения концентрации
парниковых газов в атмосфере и некоторые
результаты мониторинга**

Зав. ЛМПГ
Садовников Сергей Александрович

Москва – 2024

Задачи проекта

1. Разработка лидара дифференциального поглощения для измерения концентрации метана
2. Мониторинг концентрации парниковых газов в разных природных зонах Западной Сибири с помощью шести высотных мачт, оснащенных в рамках Межправительственного Российско-Японского соглашения
3. Создание автомобиля-лаборатории для измерений концентрации парниковых газов при обслуживании мачт, указанных в п.2, по маршруту поездки с целью выявления мезомасштабных неоднородностей распределения газов и выделения антропогенных источников, находящихся на территории Западной Сибири
4. Исследование особенностей динамики парниковых газов в фоновом, пригородном и городском районах с целью определения вкладов антропогенного и природного источников на основе измерений на TOR-станции, в обсерваториях «Фоновая» и «Базовый экспериментальный комплекс» (БЭК)

Состояние проблемы

Лидар Параметр	IPDIAL трассовый измеритель, Новосибирск, РФ [1]	TDLAS, трассовый измеритель,, Фрязино, РФ [2]	OPO/OPA пр.-разр. лидар, Neuchatel, Швейцария [3]	DOAS/IP трассовый измеритель, Québec, Канада [4]	IPDIAL трассовый измеритель, Palaiseau, Франция [5]	DIAL лидар, Shibata, Япония [6]	DIAL, лидар, Refaat, США [7]
Лазерный источник	Nd:YAG OPO (LiNbO ₃)	DFB + усилитель	Nd:YAG OPO/OPA	Nd:YAG OPO (PPLN)	Nd:YAG OPA (PPLN и KTP)	YAG:Nd OPG/OPA (QPM)	Ho:Tm:YLF
Длины волн, мкм	2.9–4.24; 1.41–1.85	1.65	3.0–3.5	1.47–3.8	2.05; 2.29; 2.06	1.6	2
Энергия в импульсе, мДж	3–40	3 Вт	12	0.15– 0.175	16–20	2–20	17.5 / 6
Контролируемые газы	CH ₄	CH ₄	C ₃ H ₆ O, CH ₃ NO ₂	H ₂ O, CO ₂ , CH ₄	H ₂ O, CO ₂ , CH ₄	CO ₂	H ₂ O, CO ₂

3

[1] Ayrapetyan V.S. Measurement of absorption spectra for atmospheric methane by a lidar system with tunable emission wavelength in the range 1.41–4.24 μm // Journal of Applied Spectroscopy. 2009. V. 76. N 2. P. 268–272.

[2] Григорьевский В.И., Садовников В.П., Элбакидзе А.В. Измерения фоновой концентрации метана дистанционным лидаром на километровых трассах в районе Московской области // Журнал радиоэлектроники. 2021. №9. С.1–12.

[3] V. Mitev et. al. Mid-IR DIAL for high-resolution mapping of explosive precursors // Proceeding of SPIE. 2013. V. 8894. P. 88940S-1–88940S-13.

[4] Lambert-Girard S., Allard M., Piché M., Babin F. Differential optical absorption spectroscopy lidar for mid-infrared gaseous measurements // Applied Optics. 2015. V. 54. N 7. P. 1647–1656.

[4] J. Barrientos Barria et al. 3.3–3.7 μm OPO/OPA optical source for multi-species 200 m range Integrated Path Differential Absorption Lidar // Applications of Lasers for Sensing and Free Space Communications. OSA. 2013. P. LTh1B. 4.

[5] D. Mammez et al. Multispecies transmitter for DIAL sensing of atmospheric water vapour, methane and carbon dioxide in the 2 μm region // SPIE Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics. 2015. P. 964507-964507-9

[6] Y. Shibata et. al. Development of 1.6 μm DIAL using an OPG/OPA transmitter for measuring atmospheric CO₂ concentration profiles // Applied Optics. 2017. V.56. N 4. P. 1194–1201

[7] Refaat T. F. et al. Airborne Testing of 2-μm Pulsed IPDA Lidar for Active Remote Sensing of Atmospheric Carbon Dioxide // Atmosphere. 2021. V. 12. N 3. P. 412.

Программное обеспечение для моделирования лидарного зондирования

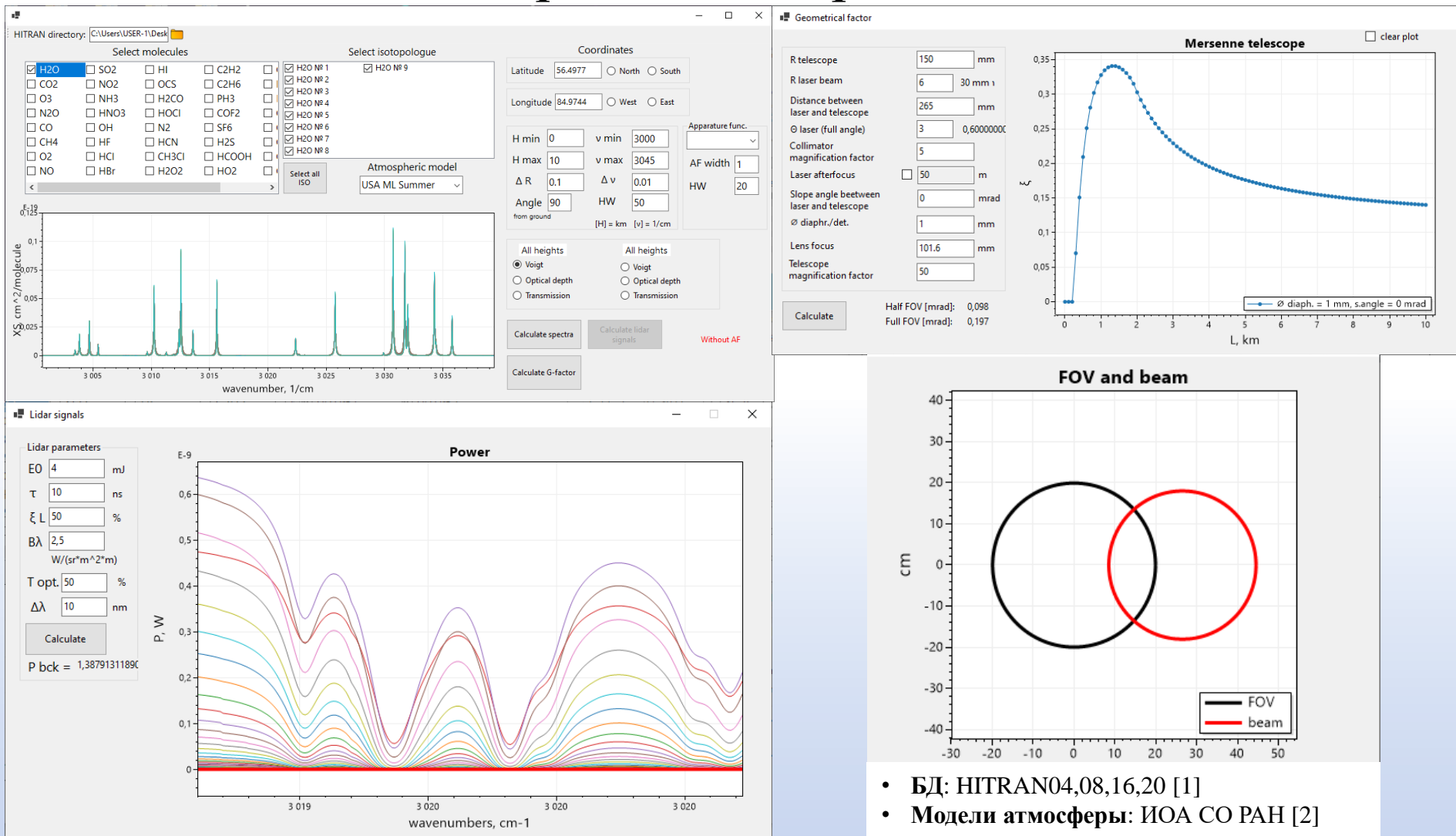


Рисунок 1 – Интерфейс программы моделирования лидарного зондирования

[1] Gordon I.E. et al. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2022. V. 277. P. 1–82.
 [2] Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы – Л.: Гидрометеиздат, 1986.

Результаты моделирования функции перекрытия лазерного пучка и поля зрения телескопа

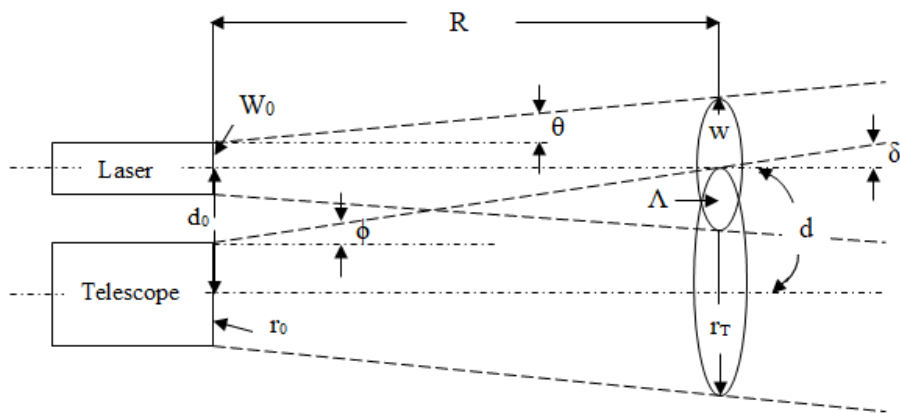


Рисунок 2 – Биаксиальная схема лидара, иллюстрирующая условие частичного перекрытия поля зрения телескопа и лазерного пучка [1]

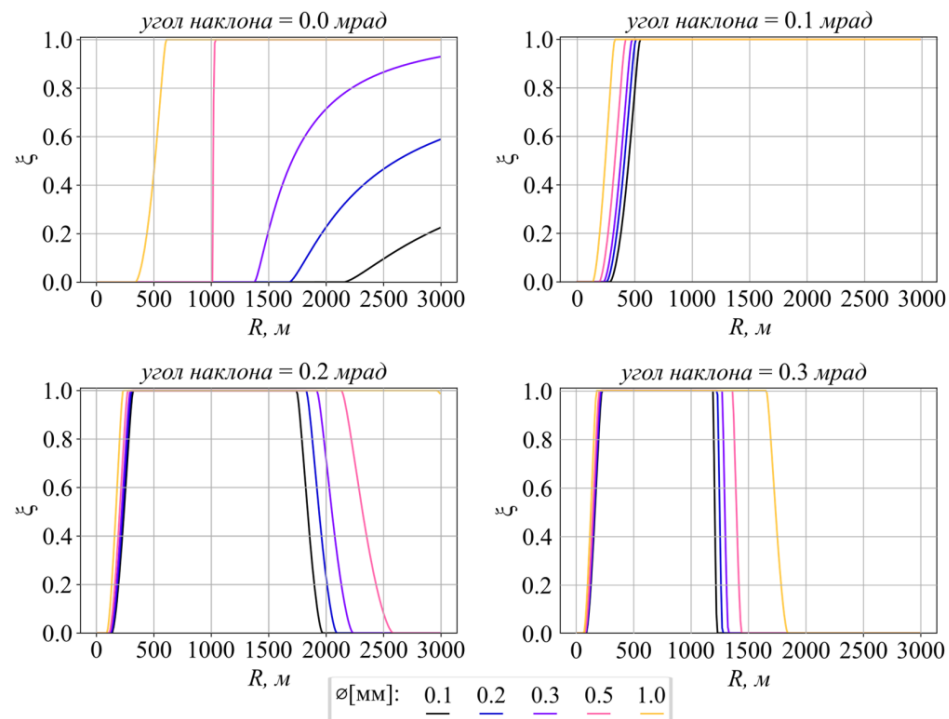
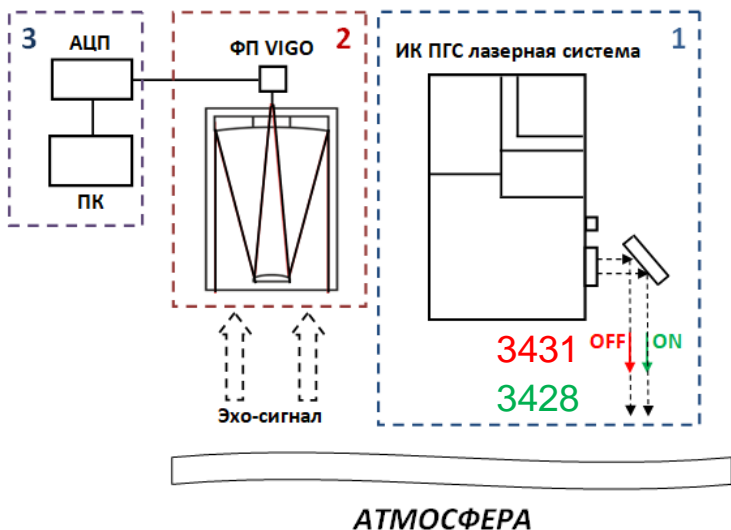


Рисунок 3 – Результаты расчета функции перекрытия (с фокусировкой лазерного пучка – 1 000 м, диаметр пучка 50 мм) [2]

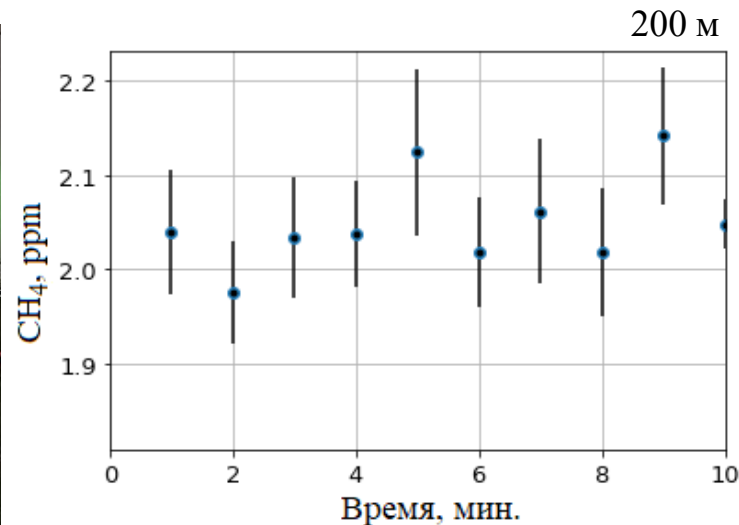
Результаты полевых испытаний лидара для измерения метана



а)



б)



в)

1 – передающий блок; 2 – приемный блок; 3 – система сбора, накопления и обработки лидарных данных

Рисунок 4 – Схема (а), внешний вид экспериментального образца лидара для измерения метана (б) и результаты измерения метана в полевых условиях (в)

Разработка лидара в волоконном исполнении

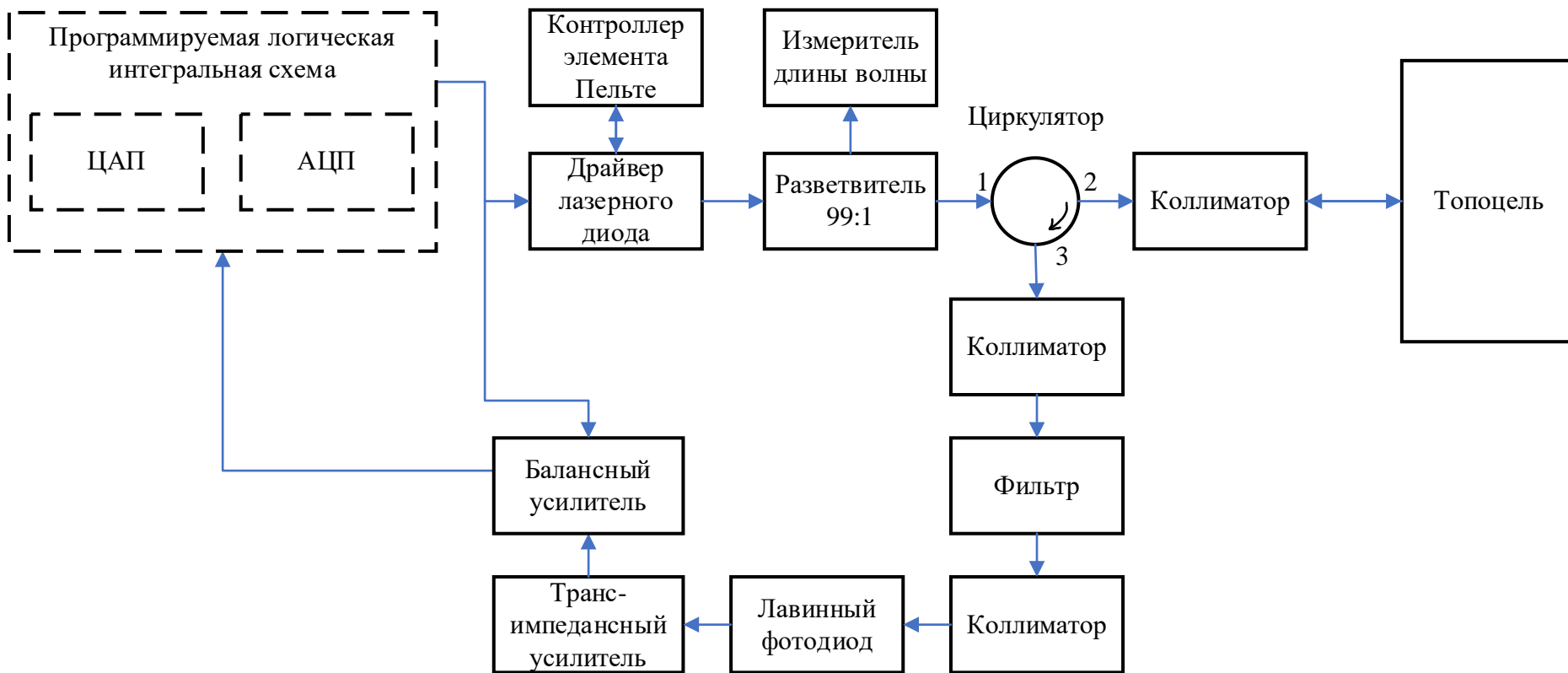
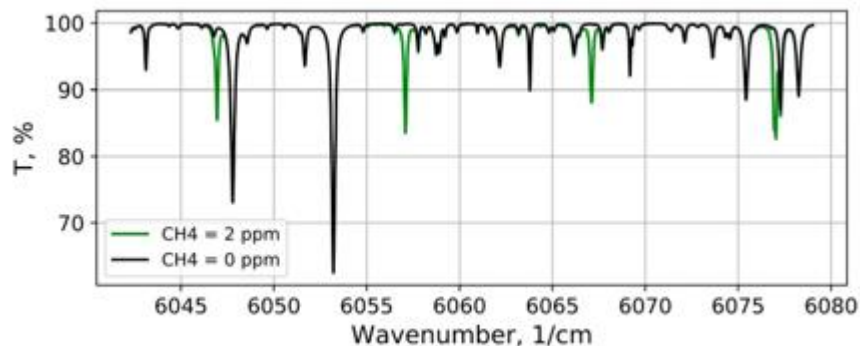
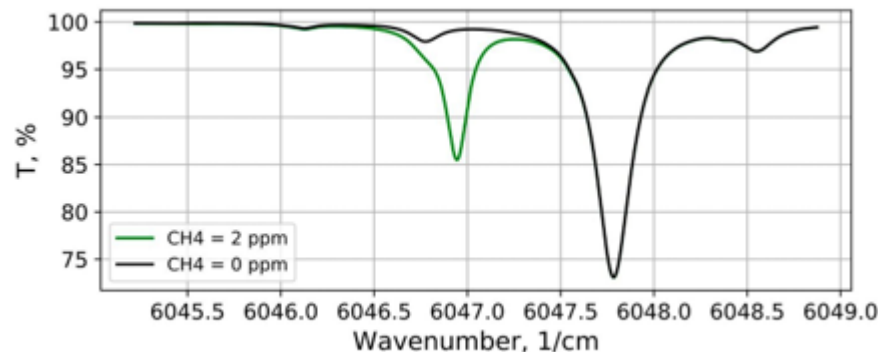


Рисунок 5 – Схема лидара для измерения CH_4 в волоконном исполнении

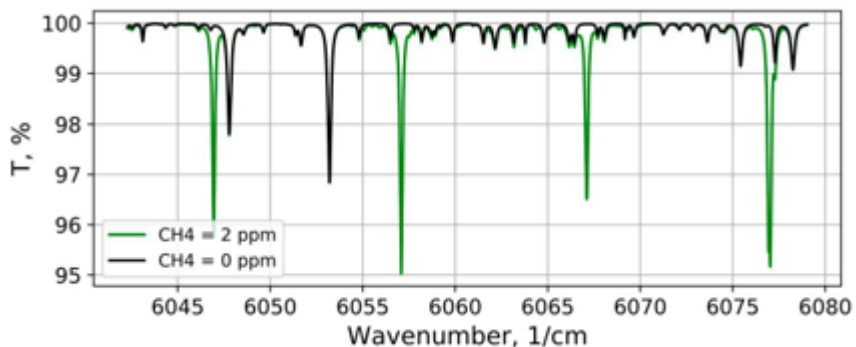
Поиск информативных диапазонов зондирования



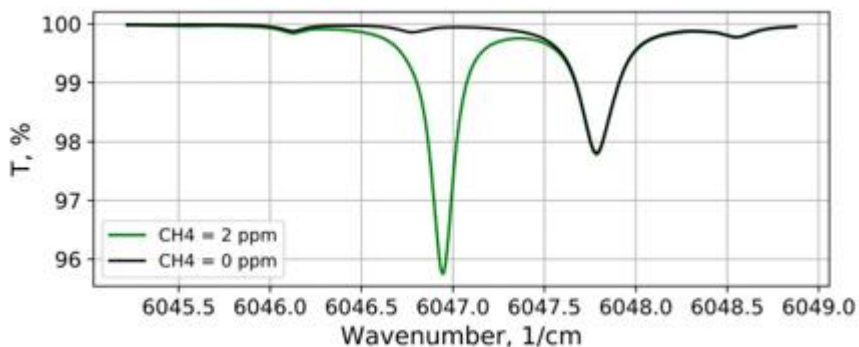
а)



б)



в)

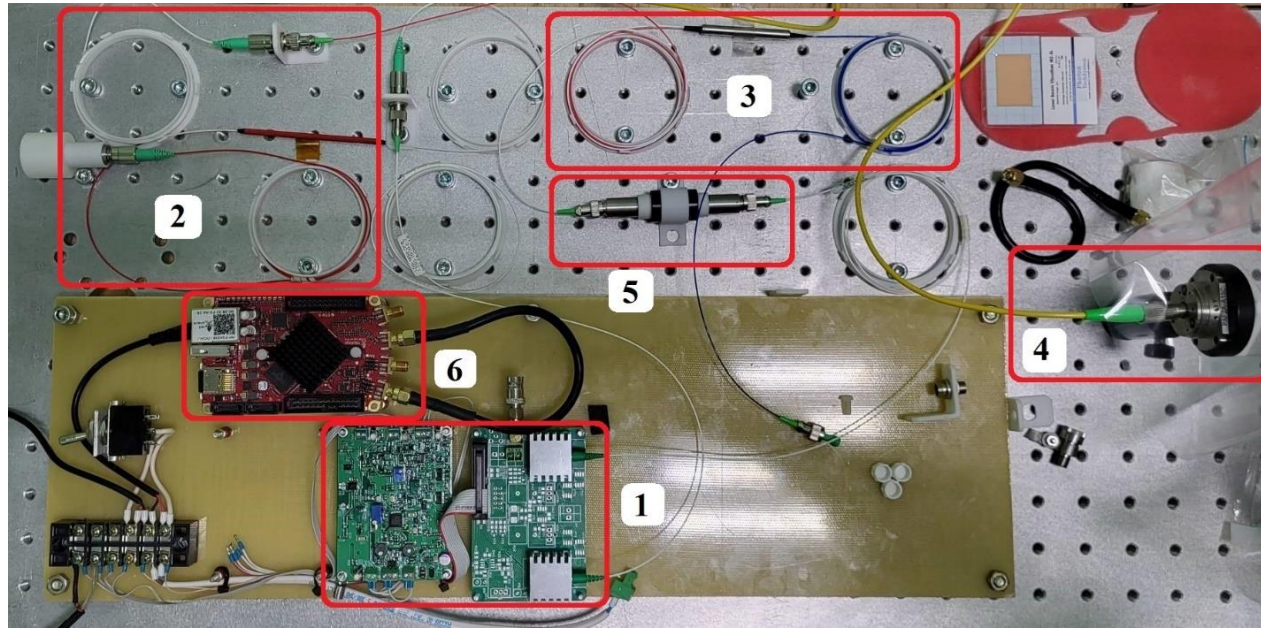


г)

а-б) тропическая зона, длина трассы 2000 м;
в-г) зима средних широт, длина трассы 500 м

Рисунок 6 – Спектры пропускания атмосферы для лазерных диодов
LDS-1650-DFB-1.25G-10/20 (LasersCom, Беларусь, (а, в)) и
PL-DFB-1653.7-A-A81-SA-14BF (LD-PD Inc., Сингапур (б, г))

Разработка волоконного лидарного измерителя метана



1 – платы питания лазера и лавинного фотодиода, 2 – делитель 99:1, 3 – циркулятор, 4 – приёмо-передающий коллиматор, 5 – сборка из двух коллиматоров и светофильтра, 6 – программируемая логическая интегральная схема
Рисунок 7 – Лидар для измерения концентрации метана в оптоволоконном исполнении

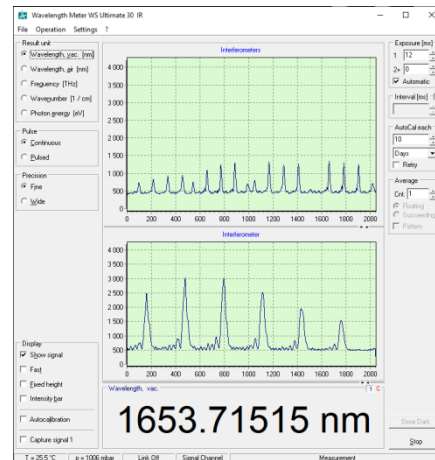
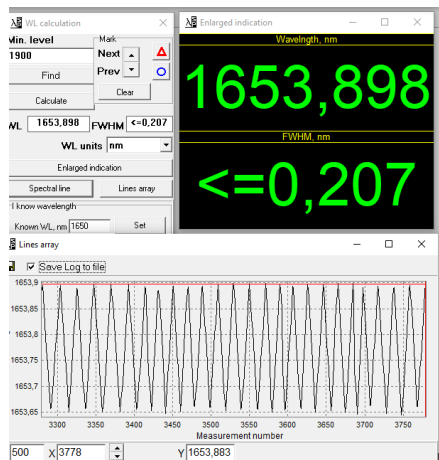


Рисунок 8 – Динамика длины волны генерации лазера, зарегистрированная с использованием SHR-IR [Минск] (а), WS UIR [Новосибирск] (б) и лидарные сигналы (в)

Результаты моделирования спектров пропускания атмосферы лидарных сигналов

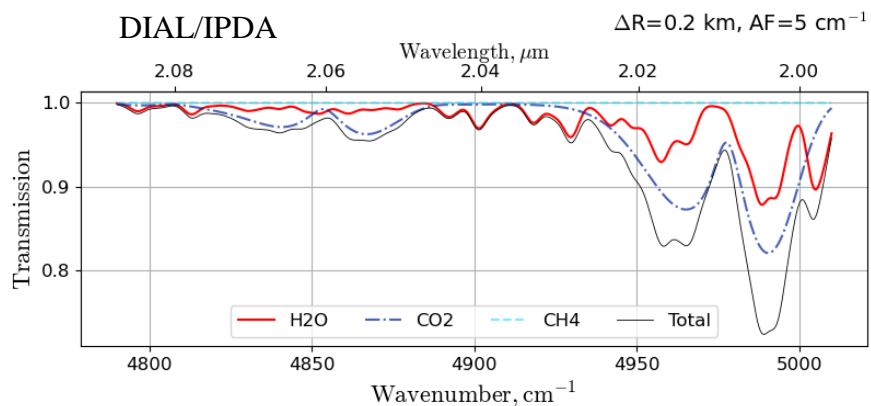


Рисунок 9 – Спектр пропускания атмосферы для ширины линии излучения лазера 5 см^{-1} (протяжённость трассы 0.2 км , модель ИОА СО РАН)

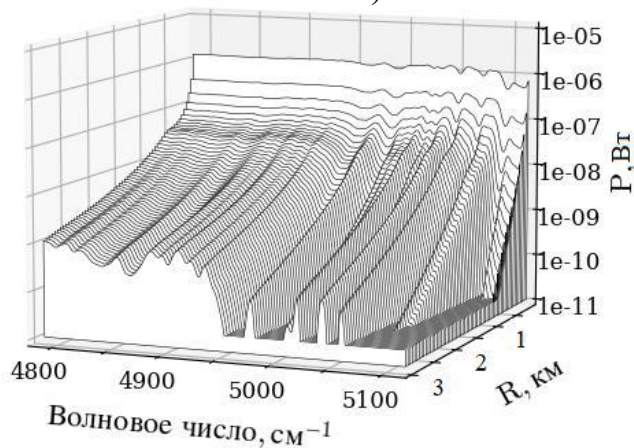


Рисунок 11 – Результат моделирования лидарного сигнала в информативном диапазоне зондирования H_2O и CO_2

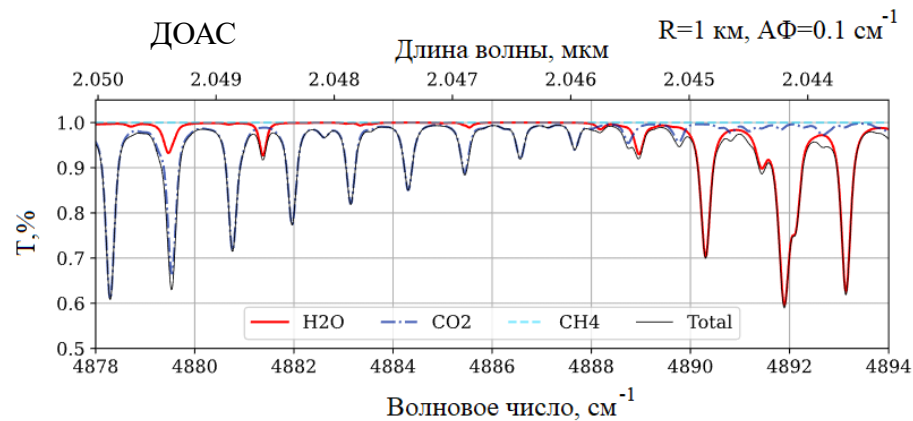
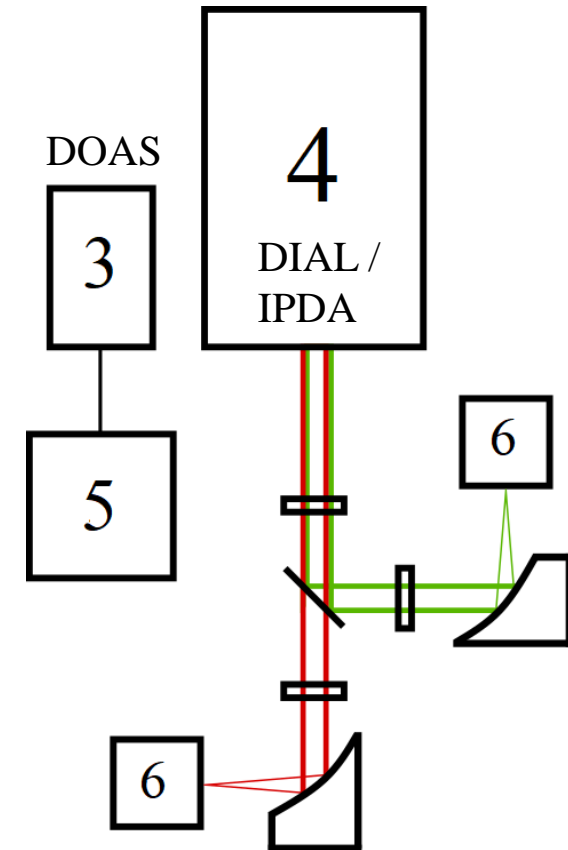
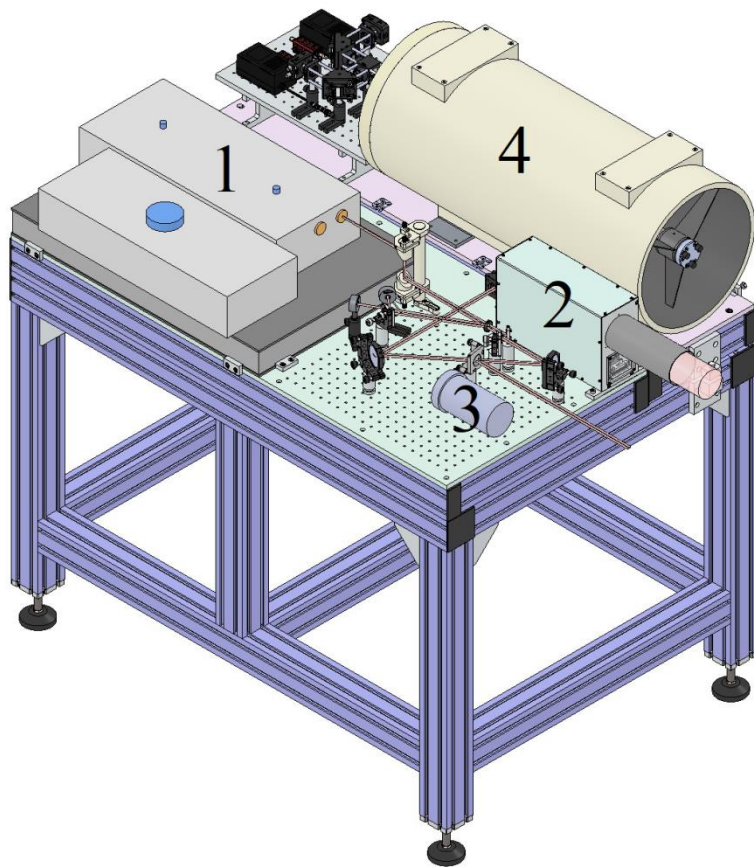


Рисунок 10 – Спектр пропускания атмосферы (Т) в информативном диапазоне зондирования H_2O и CO_2

Таблица 1 – Входные данные для проведения численного моделирования лидарных сигналов при зондировании H_2O и CO_2

Дальность зондирования, км	≤ 3
Диапазон длин волн зондирования, нм	2040–2083
Волновое число, см^{-1}	4800–4900
Энергия в импульсе, мДж	4
Аппаратная функция (АФ), см^{-1}	5
Геометрия трассы зондирования	горизонтальная
Диаметр приемной апертуры, мм	300
NEP (эквивалентная мощность шума), $\text{Вт}/\Gamma_{\Pi}^{0.5}$	$1 \cdot 10^{-11}$

Двухканальная лидарная система ИК-диапазона для измерения CO_2 и H_2O



1 – лазер, 2 – коллиматор, 3 – приемный телескоп №1, 4 – приемный телескоп №2,
5 – монохроматор/спектрограф M833, 6 – фотодетектор

Рисунок 12 – Трехмерная модель (а) и оптическая схема двухканальной лидарной системы (б)

Создание автомобиля-лаборатории для измерений концентрации парниковых газов

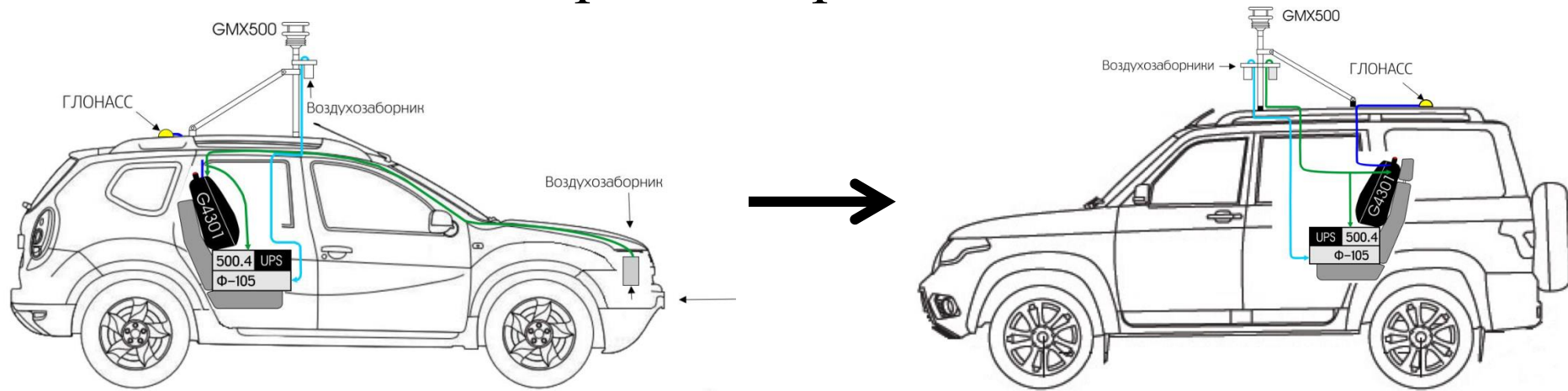


Рисунок 13 – Схема расположения оборудования

Таблица 2 – Состав и технические характеристики оборудования мобильной лаборатории

Блок	Прибор/датчик	Измеряемый параметр	Диапазон	Погрешность
Метеоблок	Метеостанция GMX500 со встроенным компасом и GPS	$t, ^\circ\text{C}$	-40...+70	$\pm 0,13 ^\circ\text{C}$
		$U, \%$	0...100	$\pm 2\%$
		$dd, ^\circ$	0...360	$\pm 3^\circ$
		$V, \text{ м/с}$	0...60	$\pm 3\%$
Блок газоанализа	Picarro G4301	$\text{CO}_2, \text{ млн}^{-1}$	0...30000	$< \pm 0,4 \text{ млн}^{-1}$
		$\text{CH}_4, \text{ млн}^{-1}$	0...20	$< \pm 0,003 \text{ млн}^{-1}$
	ОПТЭК Ф-105	$\text{O}_3, \text{ мкг/м}^3$	0...500	$\pm 2 \text{ мкг/м}^3$
			500...1000	$\pm 14 \text{ мкг/м}^3$
			1000...10000	$\pm 7\%$
ОПТЭК ОПТОГАЗ 500.4-СО	$\text{CO}, \text{ мг/м}^3$	0...50	$\pm 20\%$	

Результаты испытаний автомобиля-лаборатории



а)



б)



Рисунок 14 – Пространственное распределение концентрации CO и O₃ (а), CO₂ и CH₄ (б) полученное в ходе тестового выезда 20.10.2022 г

Результаты испытаний автомобиля-лаборатории

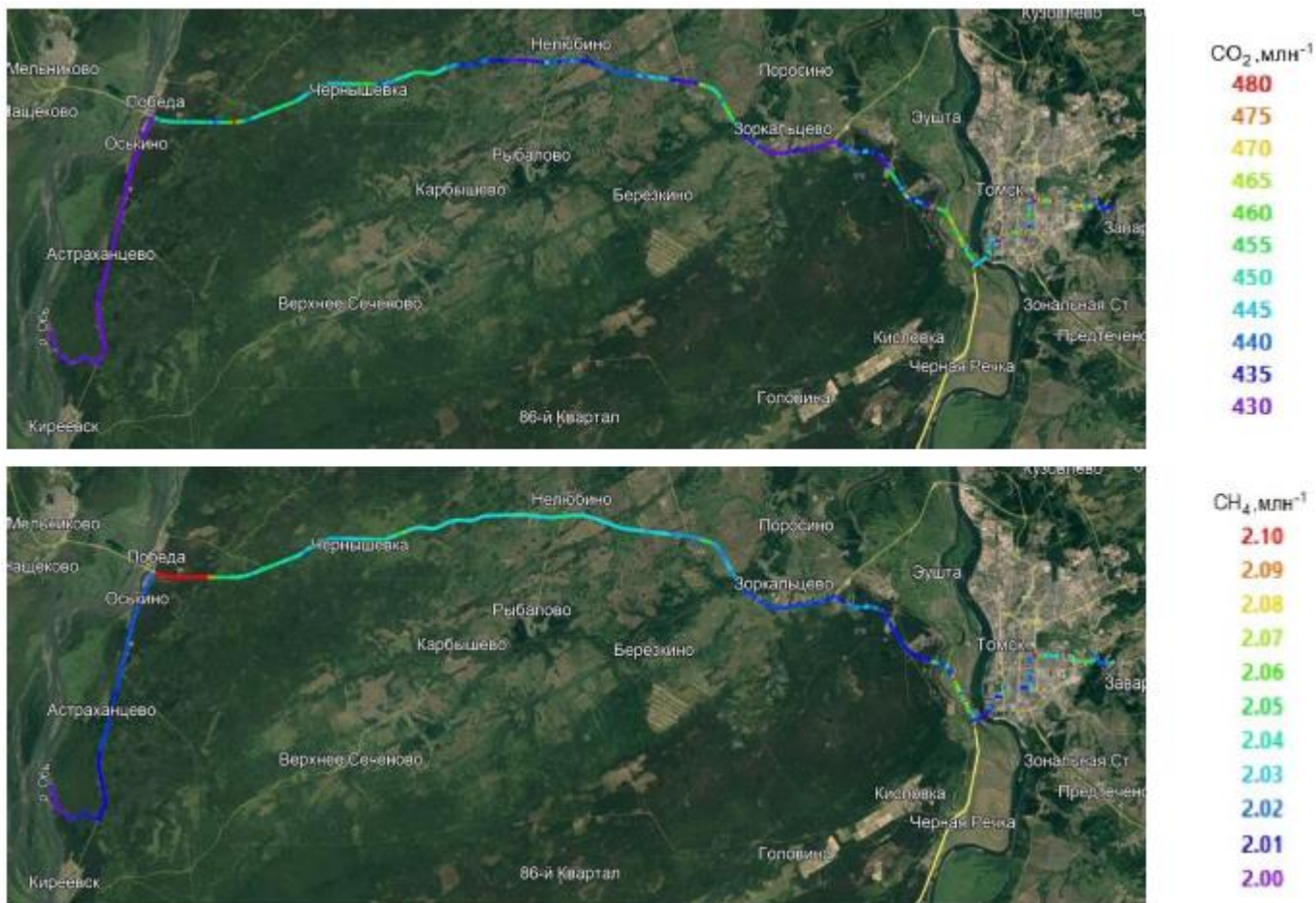
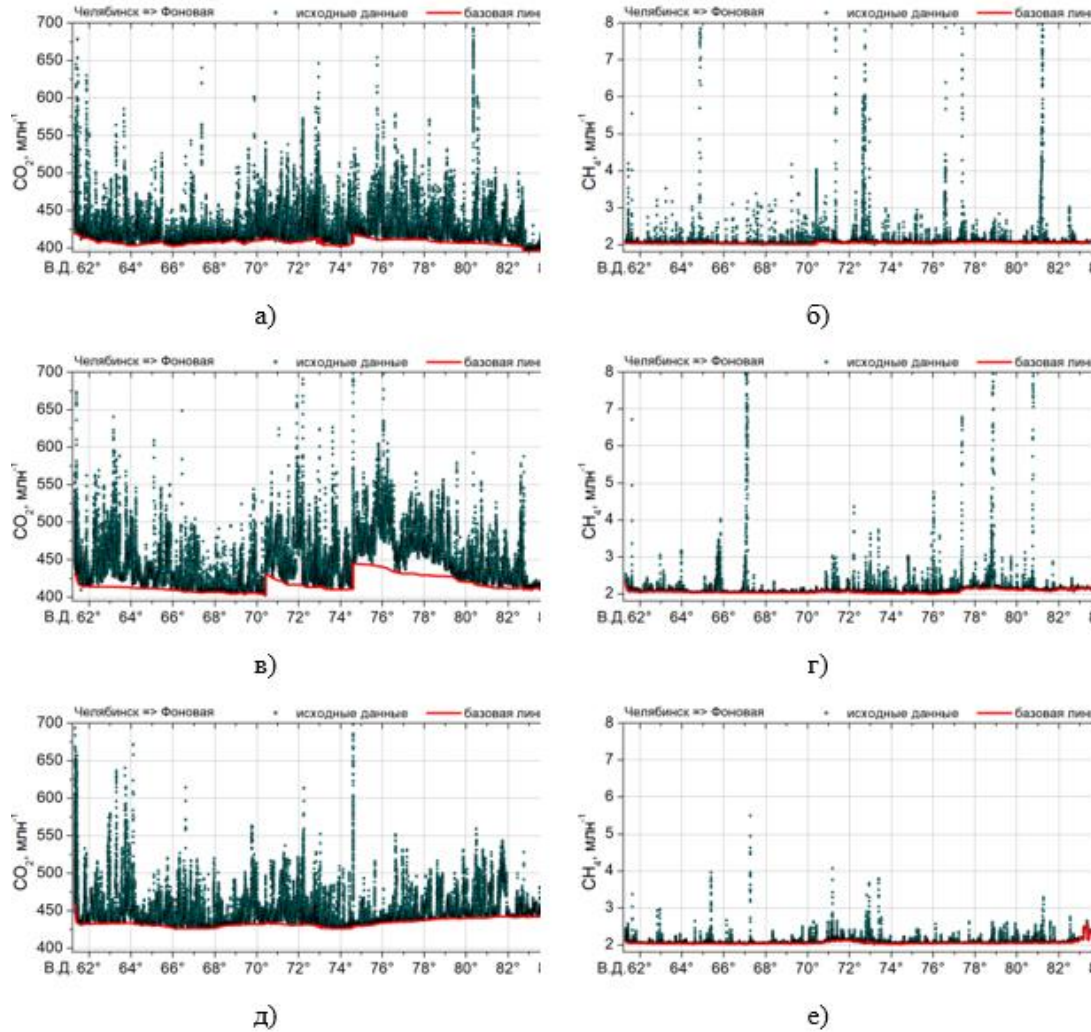


Рисунок 15 – Пространственное распределение концентрации CO₂ и CH₄, полученное между Томском и обсерваторией «Фоновая» 21.10.2022 г

Результаты измерений парниковых газов с использованием автомобиля-лаборатории



а и б – 27-29 июня 2023 г.; в и г – 29-31 августа 2023 г.; д и е – 8-10 ноября 2023 г.

Рисунок 16 – Долготные трансекты концентраций CO₂ и CH₄ полученные на участках маршрута Челябинск→Абатское→Калачинск→обсерватория Фоновая

Накопление данных о динамике парниковых газов в фоновом, пригородном и городском районах

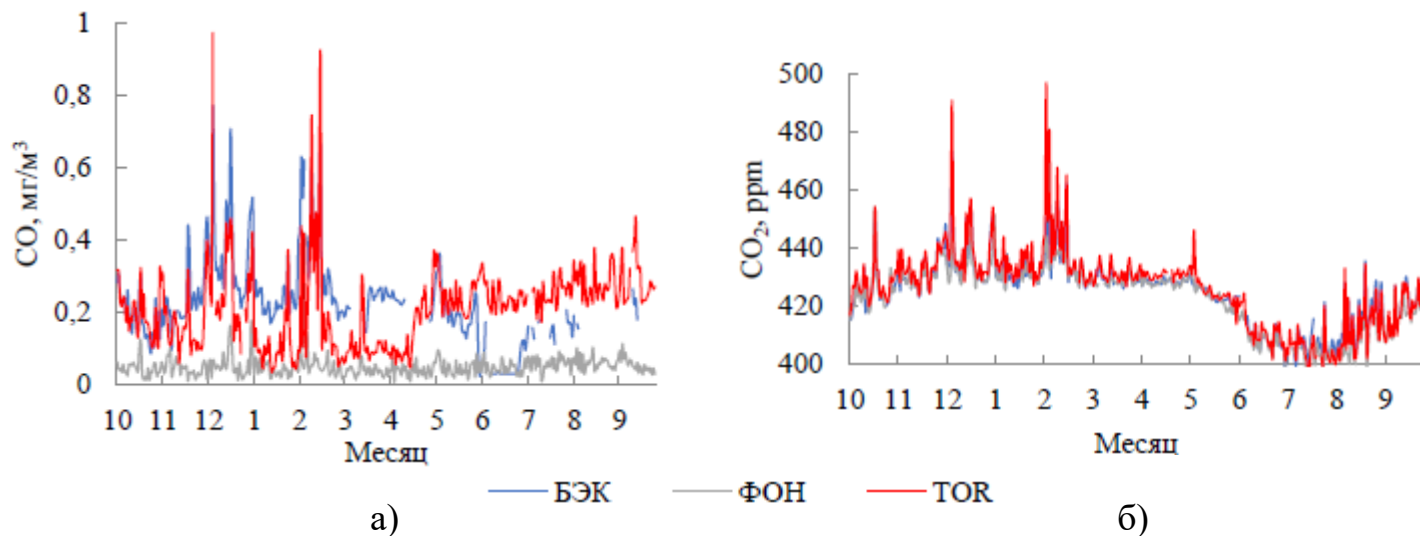


Рисунок 17 – Ход среднесуточных концентраций монооксида углерода (а) и диоксида углерода (б)

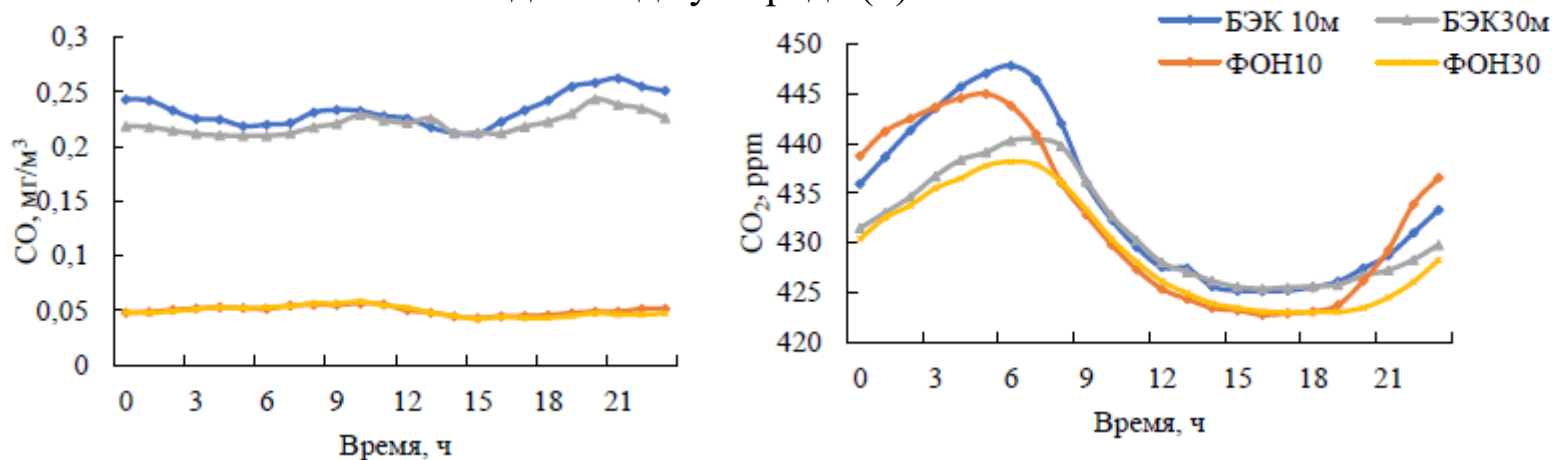


Рисунок 18 – Средние суточные хода концентрации монооксида углерода (а), диоксида углерода (б) на станциях БЭК и «Фоновая» на 10 и 30 метрах

Благодарю за внимание!

Садовников Сергей Александрович
sadsa@iao.ru