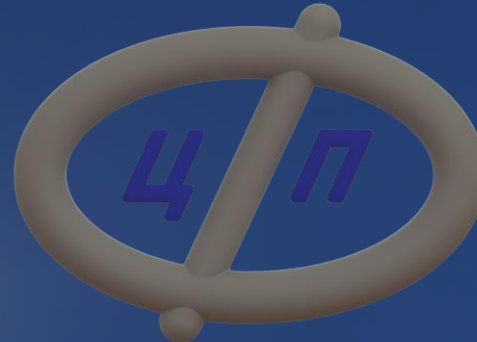




МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени Н.Э. Баумана



КАФЕДРА

ФН4

ФАКУЛЬТЕТ
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ
НАУКИ

Приборная база по контролю парниковых газов на основе метода инфракрасной спектроскопии

Научный руководитель:

д.ф.-м.н., проф., член-корр. РАН, Морозов Андрей Николаевич

Докладчик

к.ф.-м.н., доцент Фуфурин Игорь Леонидович

Варианты полезной нагрузки МКА

Оптические методы дистанционного зондирования Земли

	1 2025	2 2026	3 2027
План	ИК Фурье-спектроскопия	NDIR спектроскопия панорамного типа	Статический фурье-спектрометр
Принцип	ОКР	НИОКР	НИР
Разработка	Предполетная подготовка	Макетный образец	Физический макет
УГТ	O ₂ , CO ₂ , CH ₄ . N ₂ O, NO ₂ и SO ₂ к 2027г	O ₂ , CO ₂ , CH ₄ .	O ₂ , CO ₂ , CH ₄ .
Вещества	5 км	50 м	50 м
Размер пятна	-	Захват 10 км / Обзор 100 км	Захват 10 км / Обзор 100 км
Полоса	2 см-1	3 см-1	2 см-1
Разрешение	15 кг	15 кг	50 кг
Масса, кг			

1. ИК Фурье-спектрометр

Форм-фактор CubSat U16

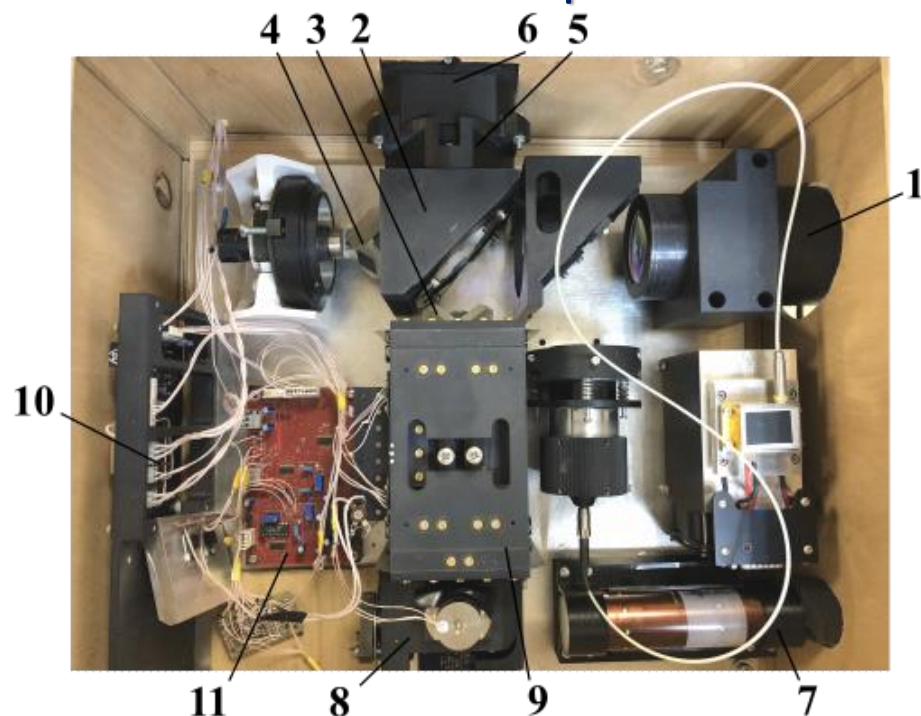


Ожидаемая характеристика:

Наименование параметра		Значение параметра
Спектральный диапазон, мкм	первый канал (O_2 , CO_2 и CH_4)	1,1 – 2,4
	второй канал (линия N_2O , NO_2 и SO_2)	3,0 – 5,0
Спектральное разрешение, cm^{-1}		2
Угловое поле зрения, рад		10^{-2}
Входная апертура, мм		100
Увеличение входной оптической системы, крат		4
Диаметр объекта наблюдения, км		5
Напряжение электропитания, В		3,3; 5; 28...40
Потребляемая мощность, Вт, не более		50
Габаритные размеры, мм	длина	270
	ширина	218
	высота	218
Масса, кг		15

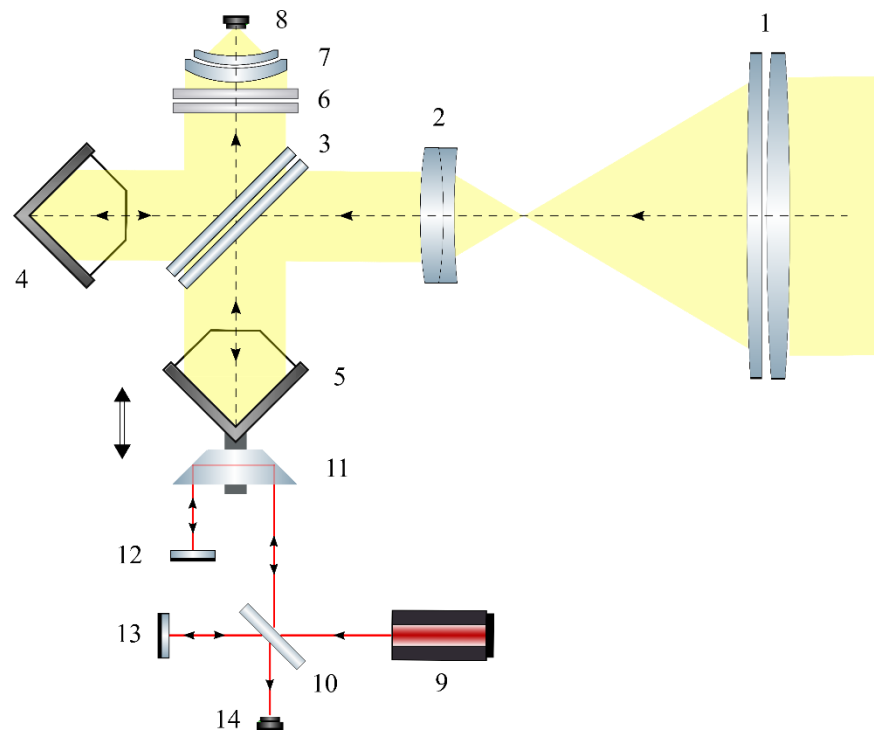
Физический макет прибора

КОНСТРУКЦИЯ



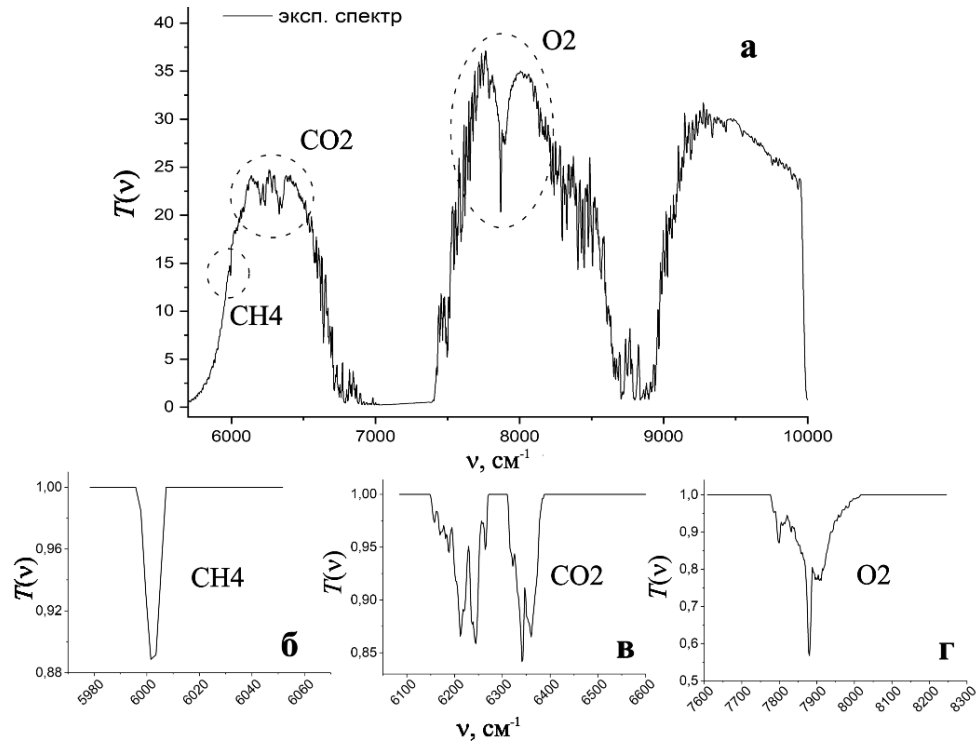
- 1 – входной объектив; 2 – светоделитель;
- 3, 4 – уголковые отражатели; 5 – фокусирующий объектив;
- 6 – приемник излучения основного канала; 7 – лазер 632 нм;
- 8 – референтный канал; 9 – параллелограмм;
- 10 – плата питания;
- 11 – плата управления линейным приводом.

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА



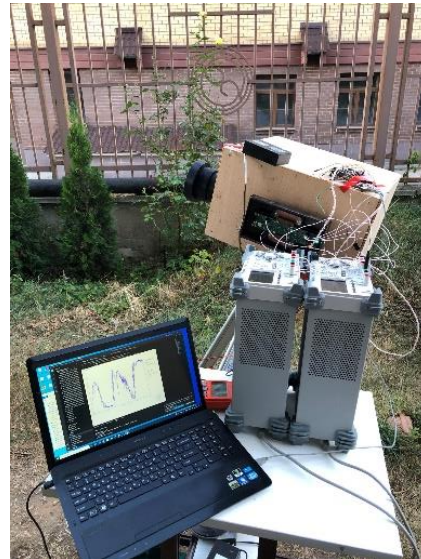
- 1, 2 – входной объектив, 3 – светоделитель,
- 4, 5 – уголковые отражатели, 6 – длинноволновые фильтры,
- 7 – фокусирующий объектив,
- 8 – приемник излучения основного канала, 9 – лазер 632 нм,
- 10 – светоделитель референтного канала, 11 – диэдр,
- 12, 13 – плоские зеркала, 14 – приемник референтного канала.

Измерения на физическом макете ИК фурье-спектрометра

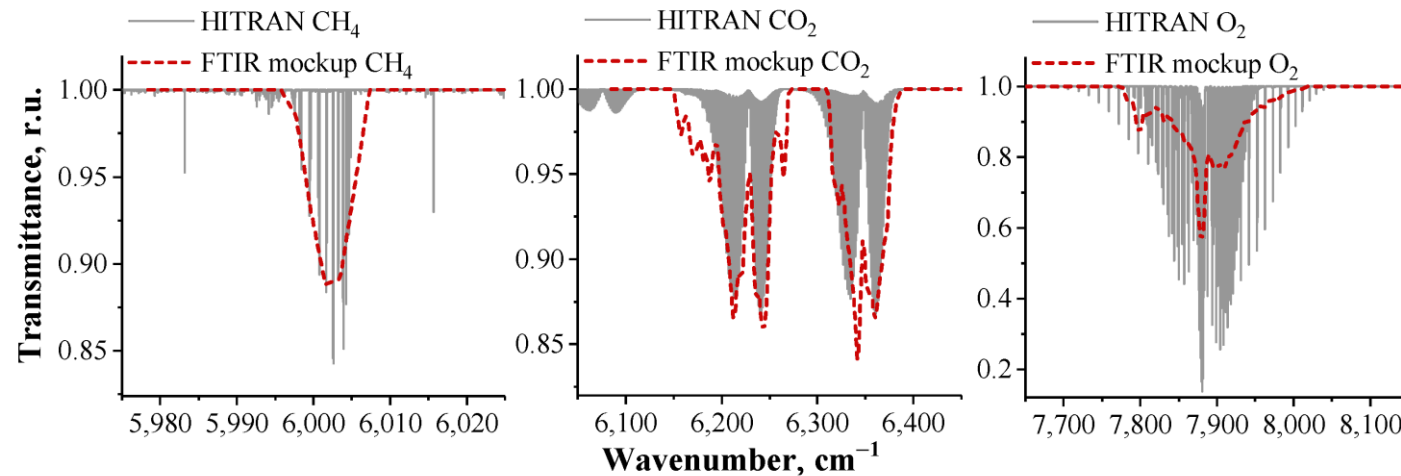


- На базе научно-исследовательской лаборатории АО «Центр прикладной физики МГТУ им. Н.Э. Баумана» проведены измерения спектров рассеянного солнечного излучения с использованием физического макета динамического ИК фурье-спектрометра

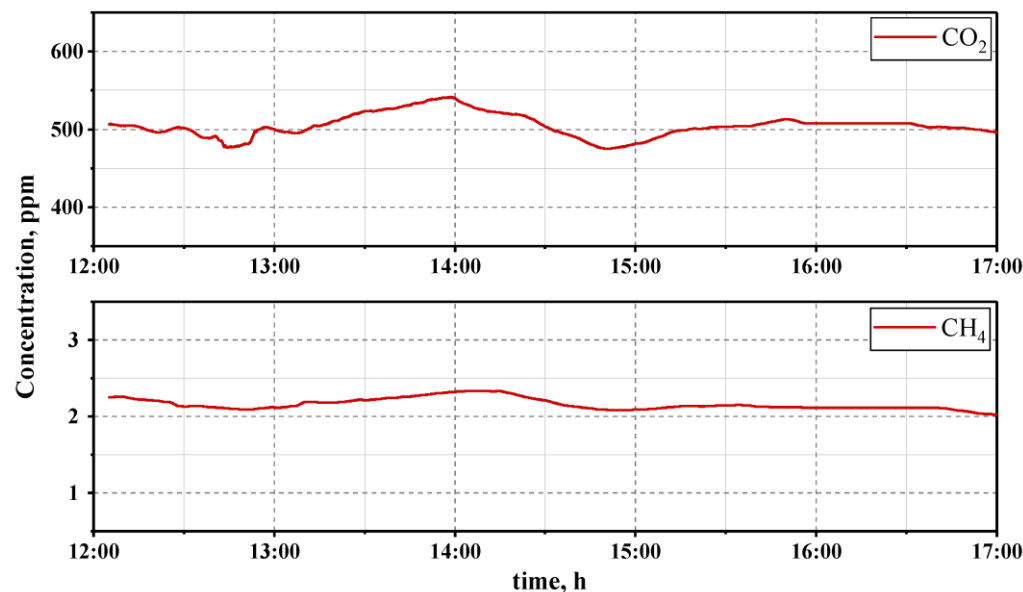
- Зарегистрированные экспериментальные спектры парниковых газов CO2 и CH4 согласуются с открытыми базами данных (HITRAN), что говорит о возможности локации парниковых газов в атмосфере



Разработка методик определения концентраций парниковых газов



Зарегистрированные
инфракрасные спектры
парниковых газов



Динамика изменения
концентраций парниковых
газов

* Mayorova, V.; Morozov, A.; Golyak, I.; Golyak, I.; Lazarev, N.; Melnikova, V.; Rachkin, D.; Svirin, V.; Tenenbaum, S.; Vintaykin, I.; et al. Determination of Greenhouse Gas Concentrations from the 16U CubeSat Spacecraft Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy. *Sensors* **2023**, *23*, 6794. <https://doi.org/10.3390/s23156794>

Общий разнесенный вид прибора и его компоновка

1 – Входная оптика

2.1 – Плата управления диафрагмой

2.2 – Автодиафрагма

3 – Блок питания и управления

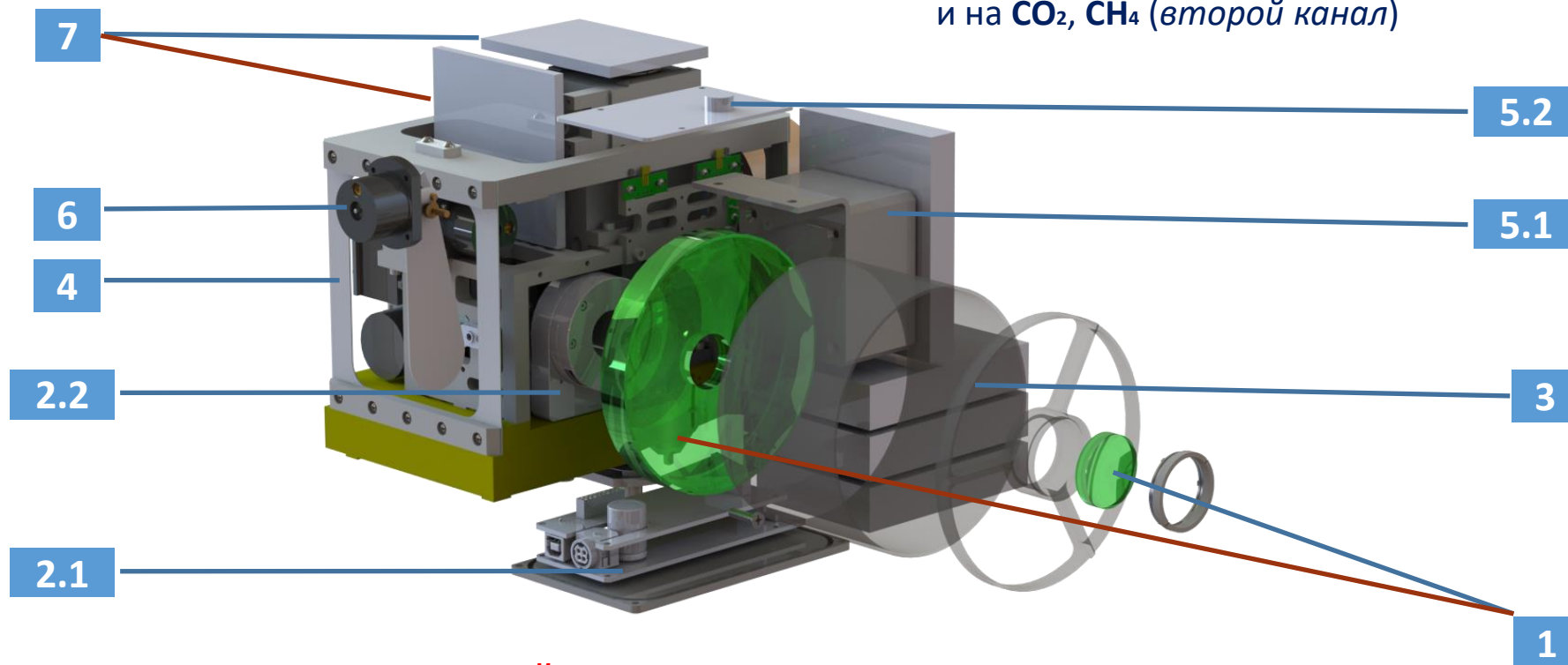
4 – Блок интерференционный

5.1 – Блок АЦП

5.2 – Блок вычислителя

6 – Аварийный автозатвор

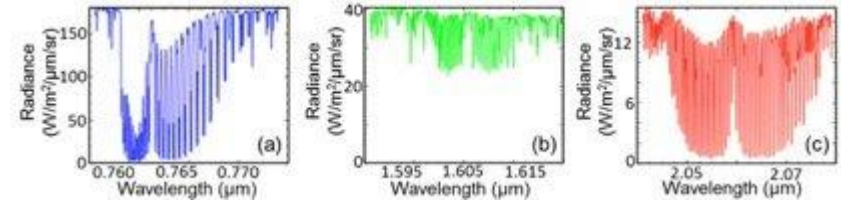
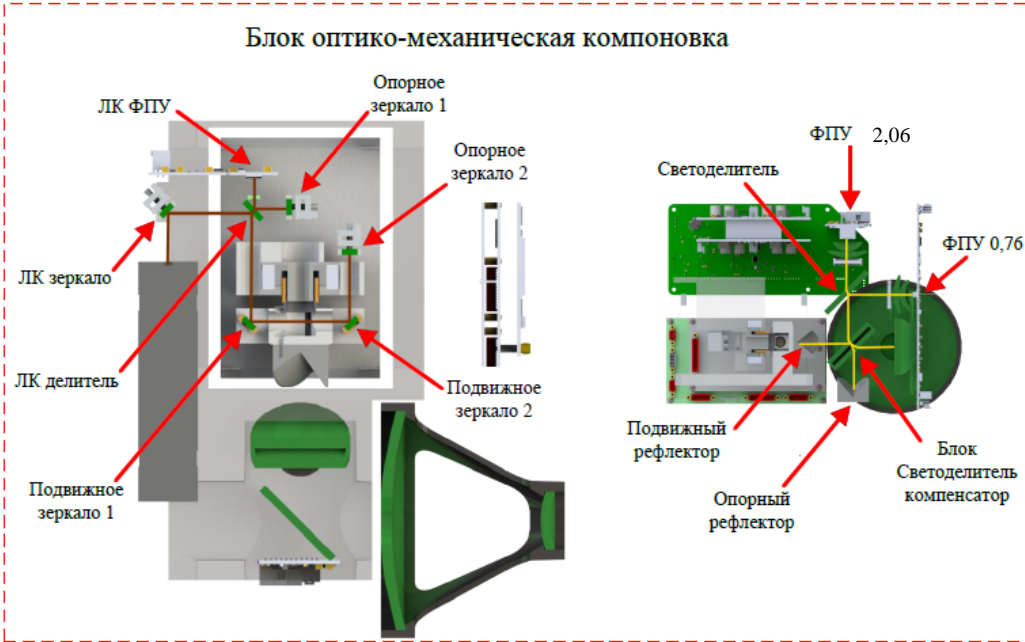
7 – Блоки ФПУ на O_2 (первый канал)
и на CO_2, CH_4 (второй канал)



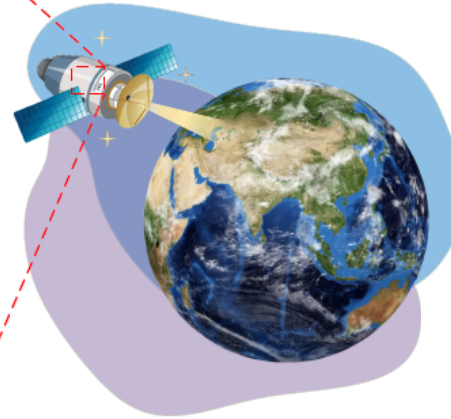
Корпус изделия не показан
Общий вид с разнесенными частями

Космический мониторинг парниковых газов

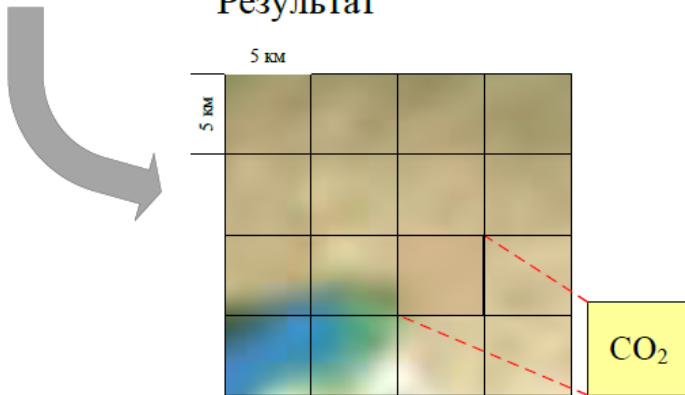
Фурье-спектрометр



Спектры O₂ и CO_{2c}

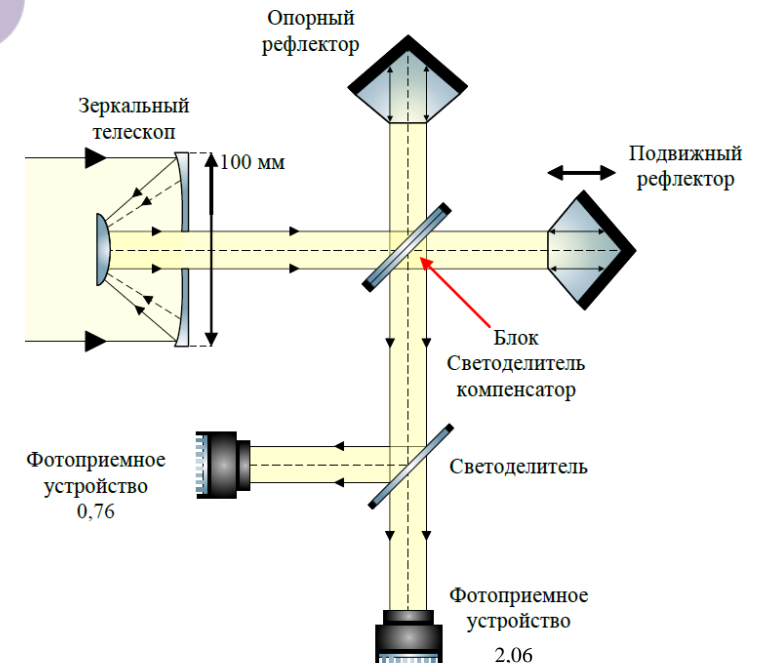


Результат



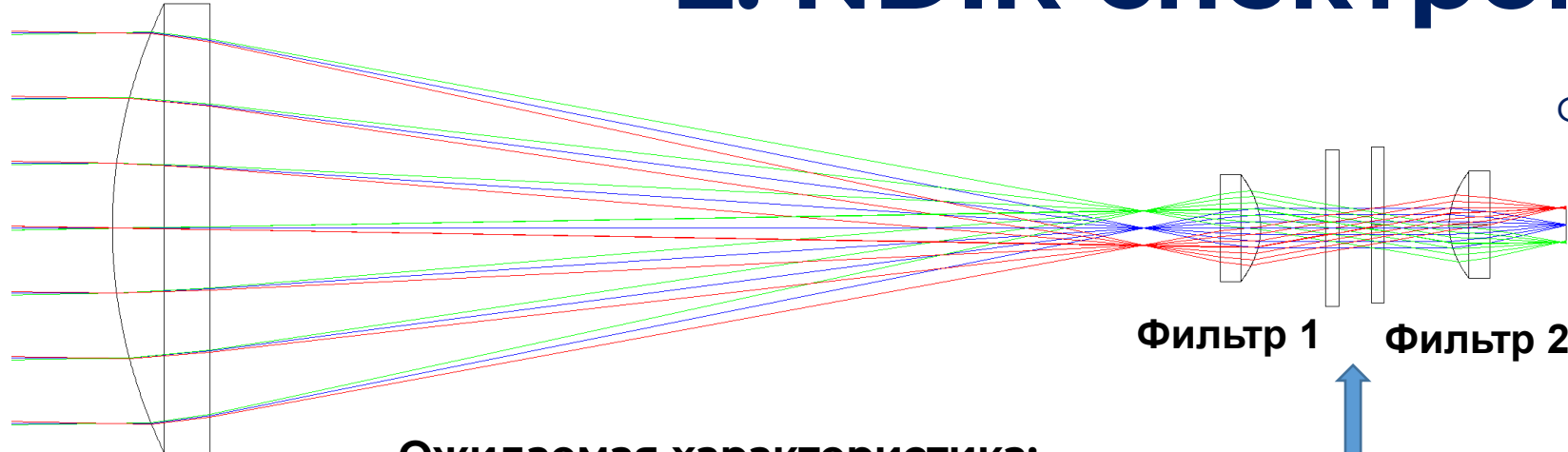
Технические характеристики

Масса, кг	15
Область регистрации (на высоте 500 км), км	5
Спектральный разрешение, см ⁻¹	2
Спектральный диапазон, мкм	0,76 и 2,06
Угловое поле зрения, рад	10 ⁻²
Режим работы – пассивный (по отраженному/рассеянному излучению)	



2. NDIR спектрометр

Телескоп



Форм-фактор Cubsat U16



Ожидаемая характеристика:

Параметр	Значение	
ОСНОВНЫЕ		
Спектральный диапазон, мкм	1,60 – 1,68	
Спектральное разрешение, см-1	3	
Угловое поле зрения, рад	$10^{-4} \times 2 \cdot 10^{-2}$	
Полоса захвата, км	10	
Пространственное разрешение, м	50	
Полоса обзора, км	100	
ГАБАРИТЫ, ПОТРЕБЛЕНИЕ		
Электропитание, В	24-28 В	
Габаритный размер, мм	длина	270
	ширина	218
	высота	218
Масса, не более, кг	15	
Энергопотребление, Вт	70	

Матричный приемник

Параметр	Значение
Камера	
Тип приемника	InGaAs
Спектральный диапазон, мкм	1,0 – 1,9
Количество элементов	640 x 480
Размер элемента, мкм	15
Фильтр 1 (полосовой)	
Спектральная диапазон, мкм	1,55-1,71
Оптическая плотность (OD)	4
Фильтр 2 (узкополосный)	
Спектральная ширина, нм	1
Центральная длина волны, нм	1,68
Оптическая плотность (OD)	4



РАЗМЕЩЕНИЕ ДВУХКАНАЛЬНОГО ГАЗАНАЛИЗАТОРА ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ МЕТАНА И УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА С ОПОРНЫМ КАНАЛОМ ПО КИСЛОРОДУ

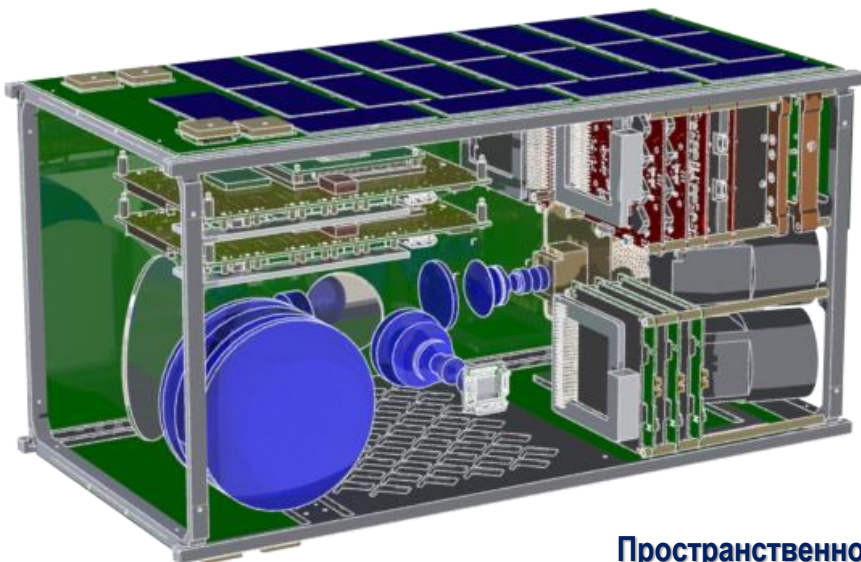
ОДИН КАНАЛ НА МЕТАН И УГЛЕКИСЛЫЙ ГАЗ

ФПУ на линии метана/углекислого газа –
Goldeye-G-CL-008-034-XSWIR-TEC2

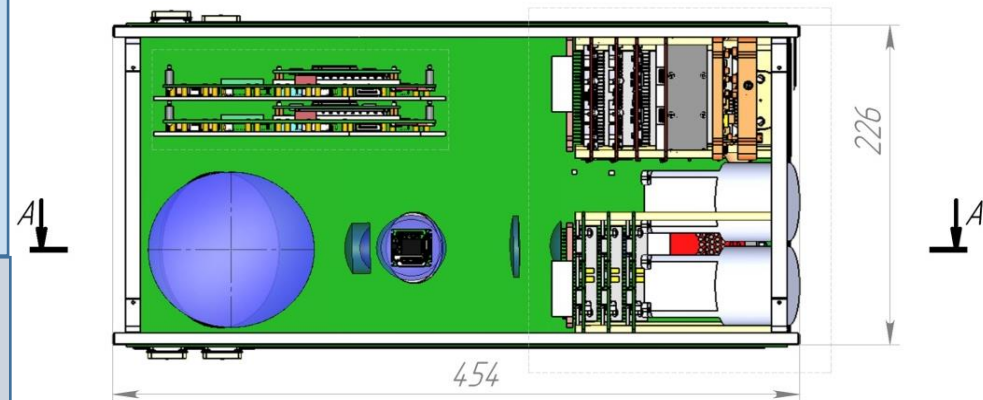
ОПОРНЫЙ КАНАЛ НА КИСЛОРОД

ФПУ на линии O₂: 1 Alvium 1800 U-052 или Alvium G5-052;
2 FCM426 «НПК «Фотоника» Россия

Размерность сенсоров **1,2 - 812 x 624** пикселей, размером **9 мкм**

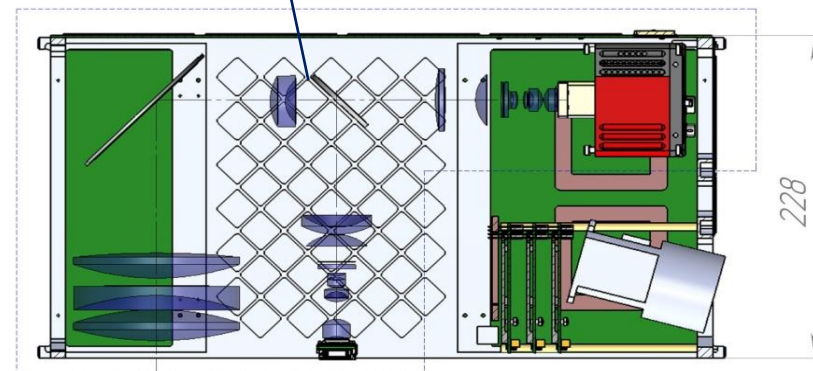


Пространственное разрешение на поверхности Земли **50 x 50 м**



Светоделитель

A - A



Камера
Alvium

Камера
Goldeye

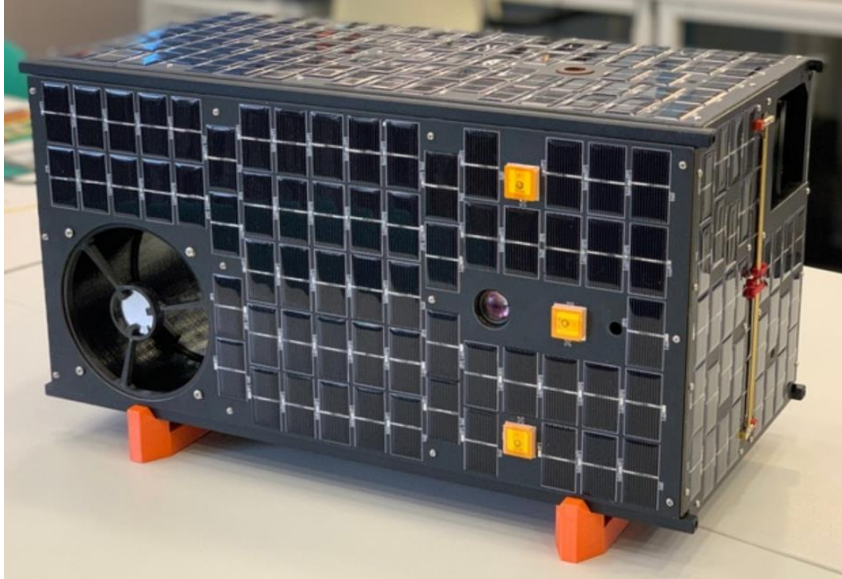
Апертура по входу в систему **100 мм**

Угловое поле зрения **3,6 x 1,2 град**

Полоса захвата **10 км**

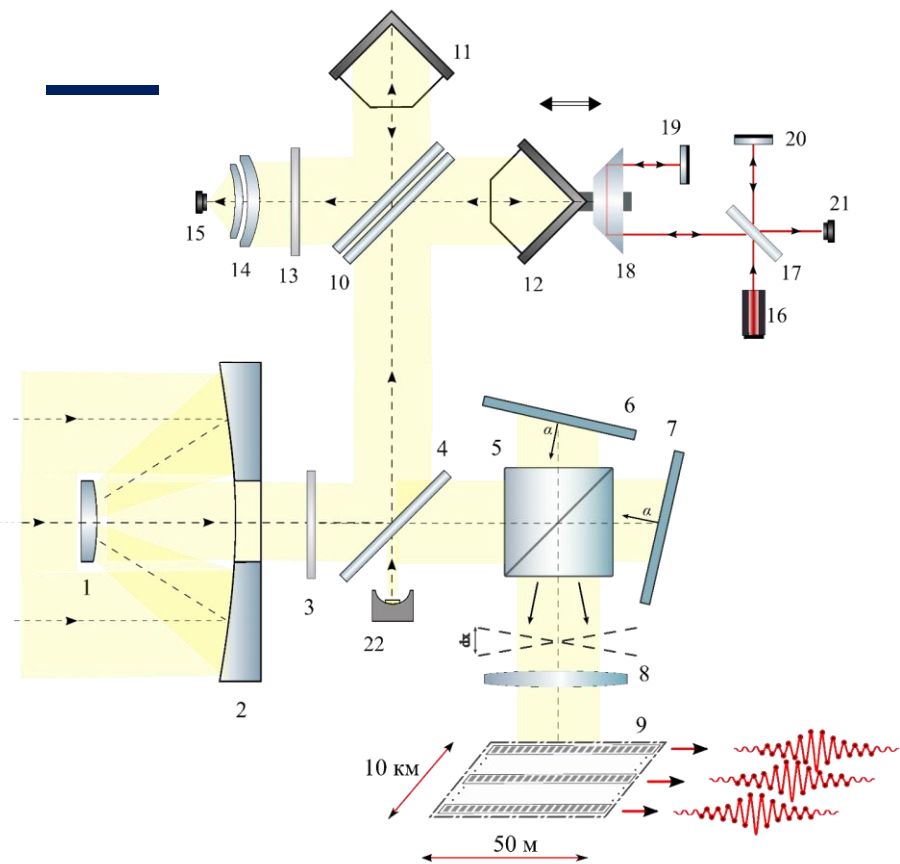
Ожидаемые характеристики панорамного малогабаритного газоанализатора космического базирования

- информационные линии:
 - CH₄ в области 1,66 мкм (6000 см⁻¹)
 - CO₂ в области 1,60 мкм (6225 см⁻¹)
- опорная линия:
 - O₂ в области 0,765 мкм (13072 см⁻¹)



Параметр		Значение
Основные		
Спектральный диапазон для регистрации метана и углекислого газа, мкм		1,60 – 1,68
Спектральный диапазон для регистрации кислорода, мкм		0,75 – 0,78
Спектральное разрешение, нм		1
Угловое поле зрения, рад		10 ⁻⁴ x 2·10 ⁻²
Полоса захвата, км		10
Пространственное разрешение на поверхности Земли, м		50
Полоса обзора, км		100
Габариты, потребление		
Электропитание, В		24-28 В
Габаритный размер, мм	длина	460
	ширина	230
	высота	230
Масса, не более, кг		30
Энергопотребление, Вт		70

3. Статический фурье-спектрометр



Оптическая схема

1, 2 – входной объектив, 3 – полосовой фильтр, 4 – светоделитель, 5 – светоделительная призма, 6, 7 – дифракционные решетки, 8 – фокусирующий объектив, 9 – матричное ФПУ, 10 – светоделитель, 11, 12 – угольные отражатели, 13 – длинноволновый фильтр, 14 – фокусирующий объектив, 15 – приемник излучения, 16 – лазер 632 нм, 17 – светоделитель референтного канала, 18 – диэдр, 19, 20 – плоские зеркала, 21 – приемник референтного канала, 22 – опорный источник

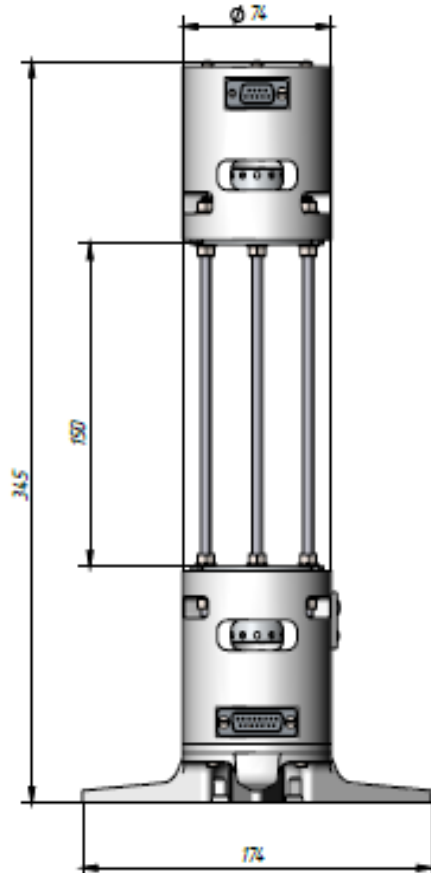
Ожидаемая характеристика:

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ	
ОСНОВНОЙ СПЕКТРОМЕТР		
Тип системы	Статический фурье-спектрометр	
Спектральный диапазон, см ⁻¹	5990 - 6270	
Спектральное разрешение, см ⁻¹	2	
Угловое поле зрения, рад	10 ⁻⁴ × 2·10 ⁻²	
Полоса захвата, км	10	
Пространственное разрешение, м	50	
Полоса обзора, км	100	
ОПОРНЫЙ СПЕКТРОМЕТР		
Тип системы	Динамический спектрометр	фурье-
Спектральный диапазон, см ⁻¹	4300 - 9100	
Спектральное разрешение, см ⁻¹	2	
Угловое поле зрения, рад	10 ⁻²	
Полоса захвата, км	5	
ГАБАРИТЫ, ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ		
Электропитание, В	24-28 В	
Габаритный размер, мм, ДхШхВ	600x250x250	
Масса, не более, кг	30	
Энергопотребление, Вт	80-100	

4. Прибор для измерения концентраций CO₂ и H₂O методом недисперсионной спектроскопии с открытой газовой кюветой



Аналог Li-Cor LI-7500

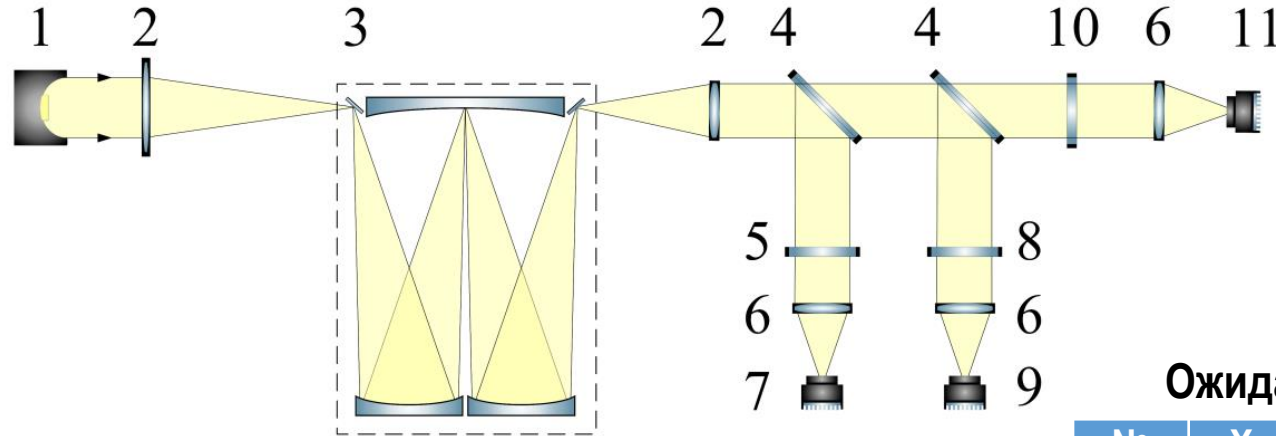


Разрабатываемый прибор

Технические характеристики газоанализаторов

№ п/п	Характеристика	Единица	Li-7500	ПРИБОР
1	Вещества	-	CO ₂ и H ₂ O	CO ₂ и H ₂ O
2	Чувствительность	ppm	0,5	1
3	Частота измерений	Гц	5, 10, 20	10
4	Масса	кг	0,93	1
5	Потребляемая мощность	Вт	8	30

5. Прибор для измерения концентраций CH₄ и N₂O методом недисперсионной спектроскопии с открытой газовой кюветой



- 1 – ИК излучатель;
- 2, 6 – объектив;
- 3 – многоходовая кювета;
- 4 – светоделитель;
- 5, 8, 10 – светофильтры;
- 7 – опорный канал (3,5-3,9 мкм);
- 9 – канал N₂O (4,5-4,7 мкм);
- 11 – канал CH₄ (3,30-3,32 мкм).

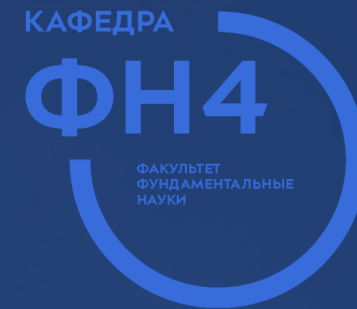
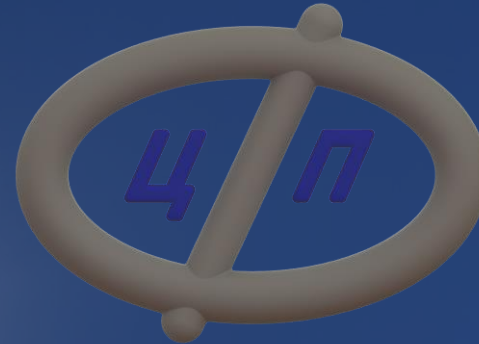
Близкий аналог LI-COR LI7700

Ожидаемые технические характеристики

№ п/п	Характеристика	Единица	Значение
1	Вещества	-	CH ₄ и N ₂ O
2	Отношение сигнал/шум	-	10 ⁵ по CH ₄ 10 ⁶ по N ₂ O
3	Чувствительность	ppb	20 по CH ₄ 10 по N ₂ O
3	Частота измерений	Гц	10
4	Масса	кг	8
5	Потребляемая мощность	Вт	70



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени Н.Э. Баумана



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

Фуфурин Игорь Леонидович

+7-903-611-75-04

igfil@bmstu.ru