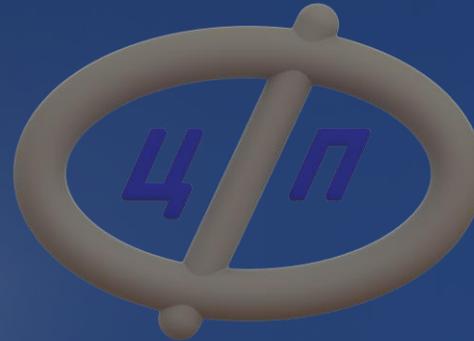




МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени Н.Э. Баумана



# 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 <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> . <i>N<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub> и SO<sub>2</sub> к 2027г</i>	O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> .	O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> .
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

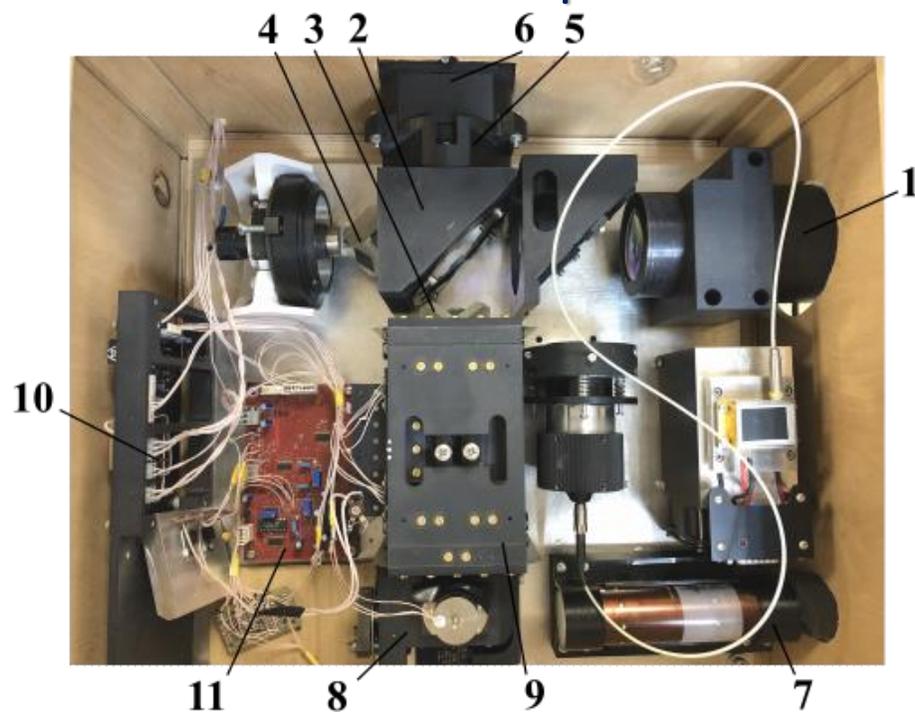


Ожидаемая характеристика:

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

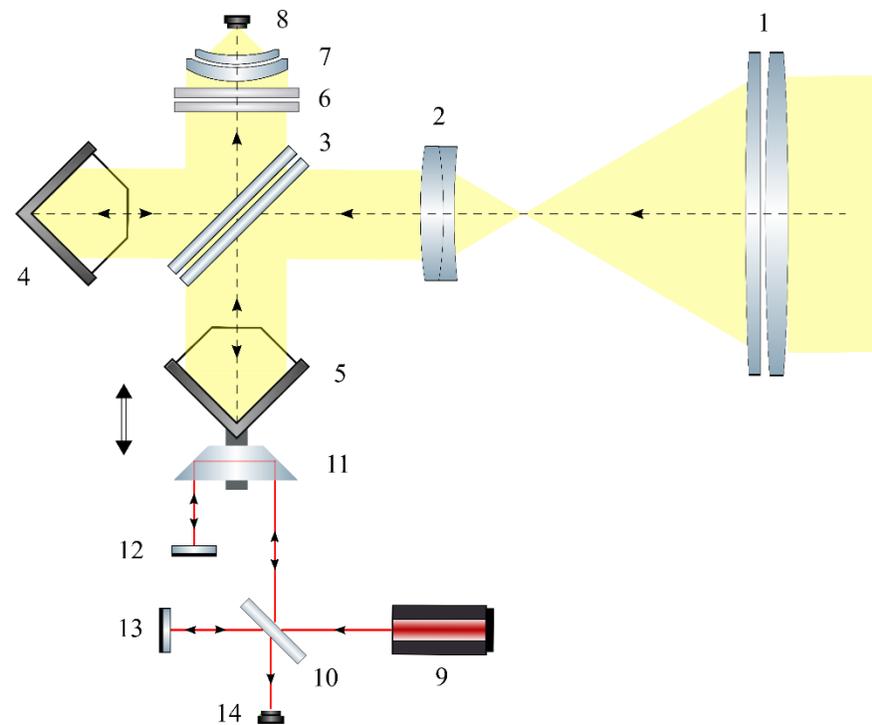
# Физический макет прибора

## КОНСТРУКЦИЯ



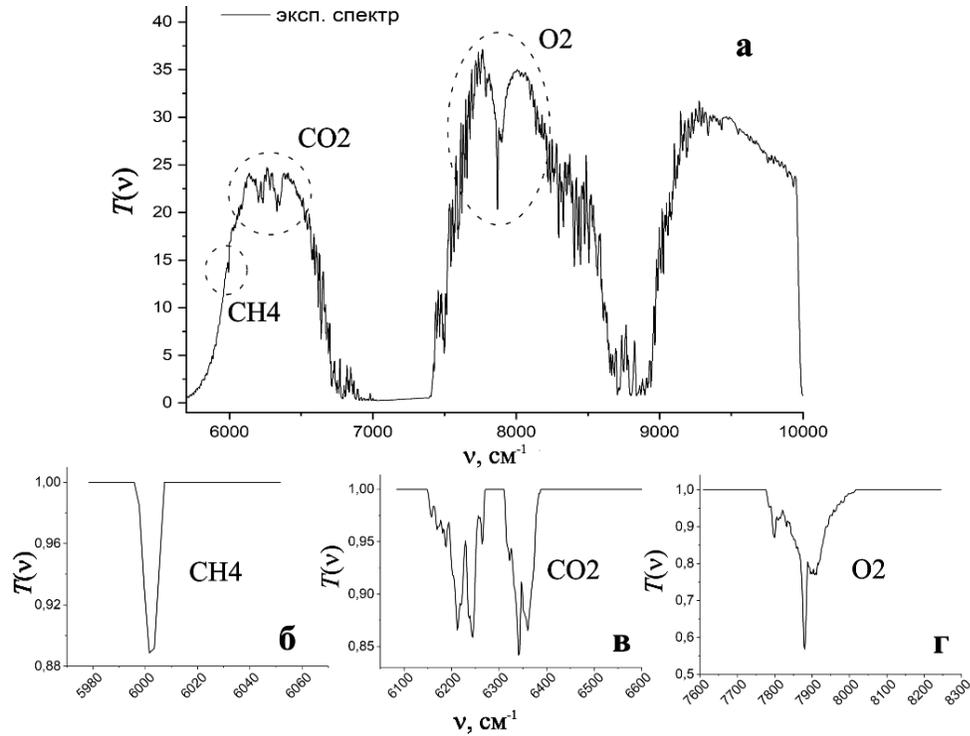
- 1 – входной объектив; 2 – светоделитель;
- 3, 4 – уголковые отражатели; 5 – фокусирующий объектив;
- 6 – приемник излучения основного канала; 7 – лазер 632 нм;
- 8 – референтный канал; 9 – параллелограмм;
- 10 – плата питания;
- 11 – плата управления линейным приводом.

## 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

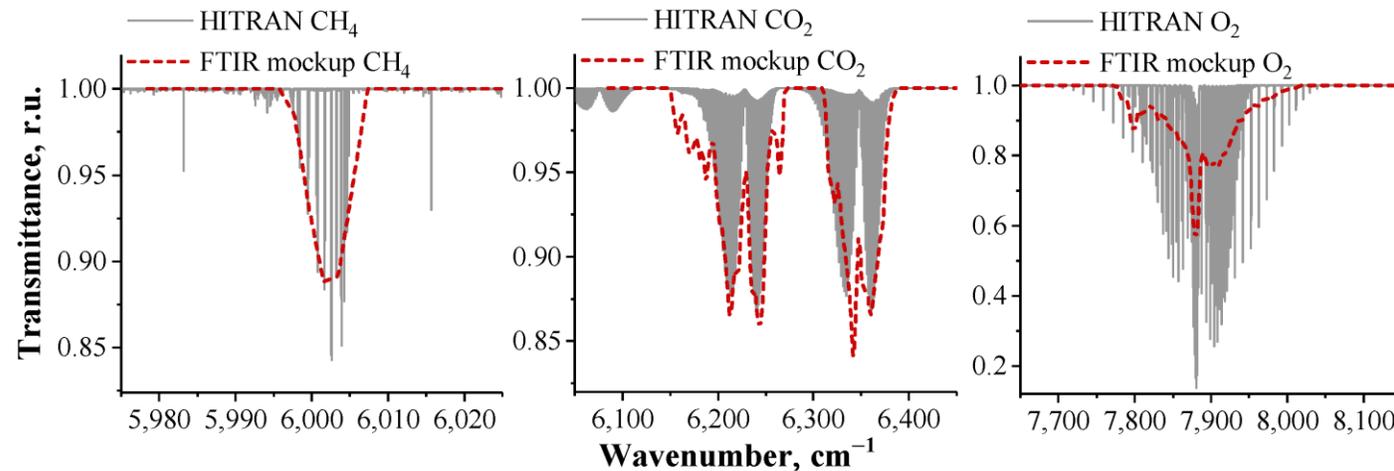


- На базе научно-исследовательской лаборатории АО «Центр прикладной физики МГТУ им. Н.Э. Баумана» проведены измерения спектров рассеянного солнечного излучения с использованием физического макета динамического ИК фурье-спектрометра

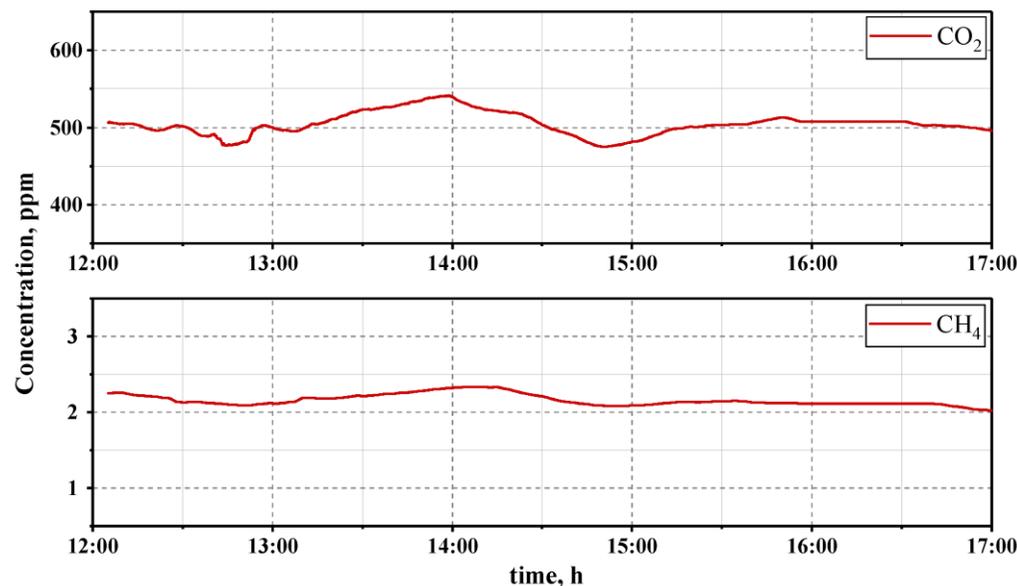
- Зарегистрированные экспериментальные спектры парниковых газов CO2 и CH4 согласуются с открытыми базами данных (HITRAN), что говорит о возможности локализации парниковых газов в атмосфере



# 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

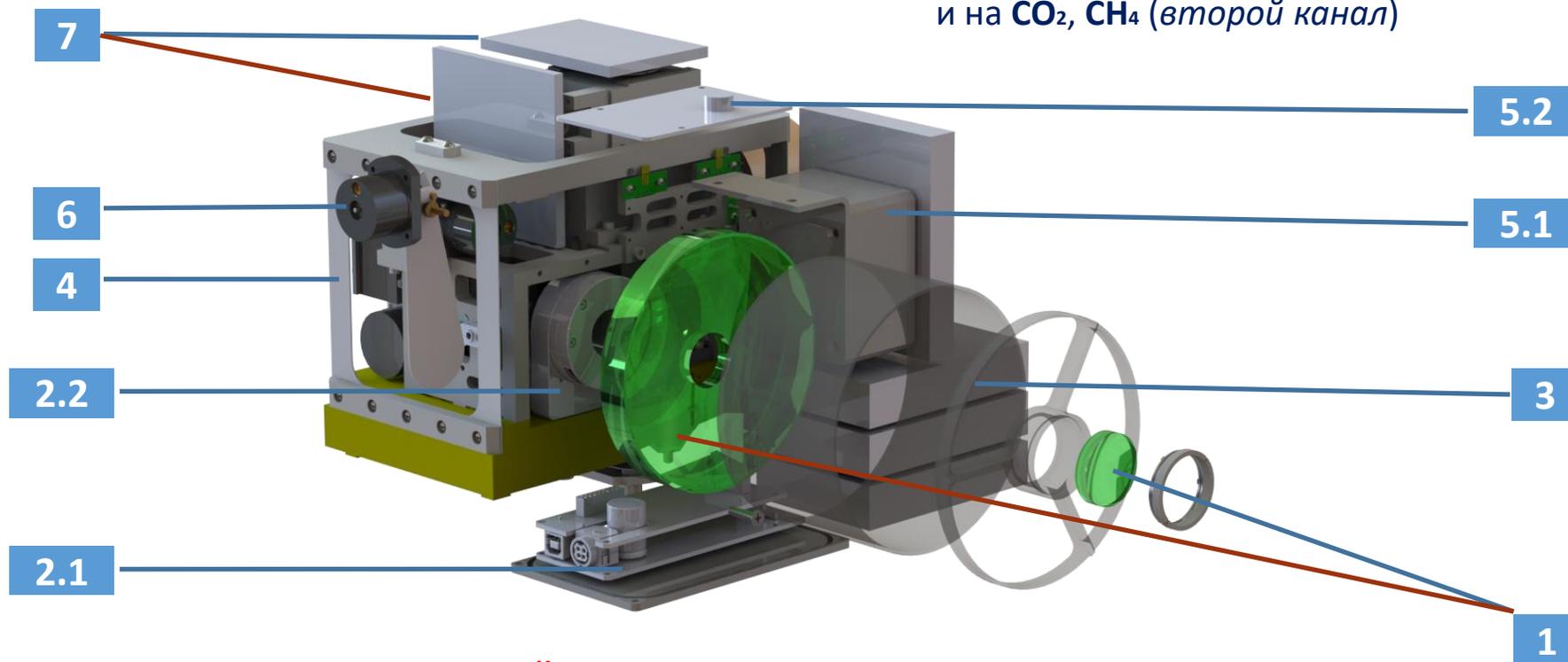
4 – Блок интерференционный

5.1 – Блок АЦП

5.2 – Блок вычислителя

6 – Аварийный автозатвор

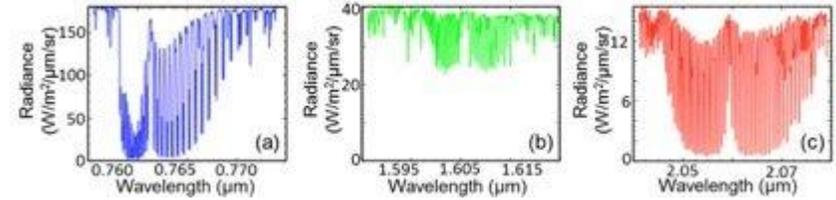
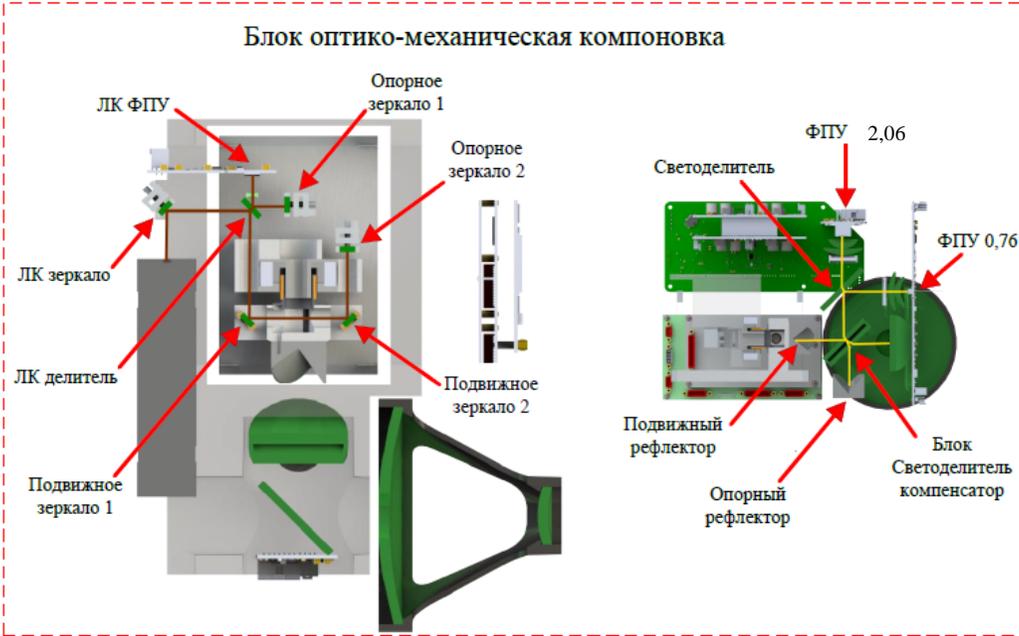
7 – Блоки ФПУ на  $O_2$  (первый канал)  
и на  $CO_2$ ,  $CH_4$  (второй канал)



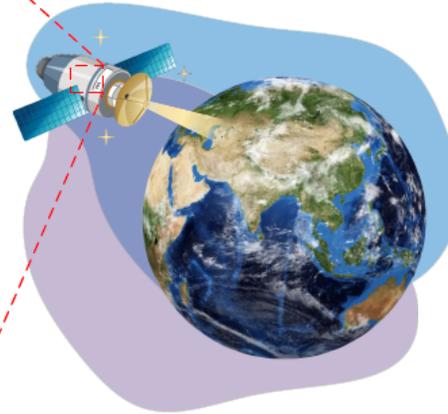
Корпус изделия не показан  
Общий вид с разнесенными частями

# Космический мониторинг парниковых газов

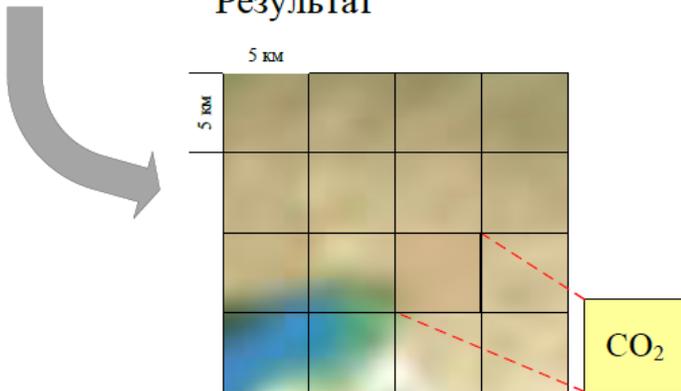
## Фурье-спектрометр



Спектры O<sub>2</sub> и CO<sub>2c</sub>

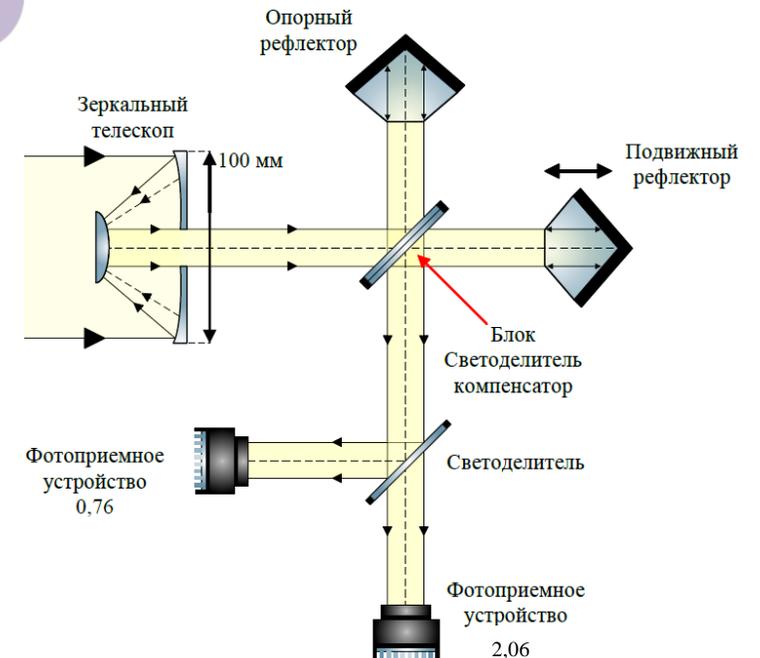


## Результат



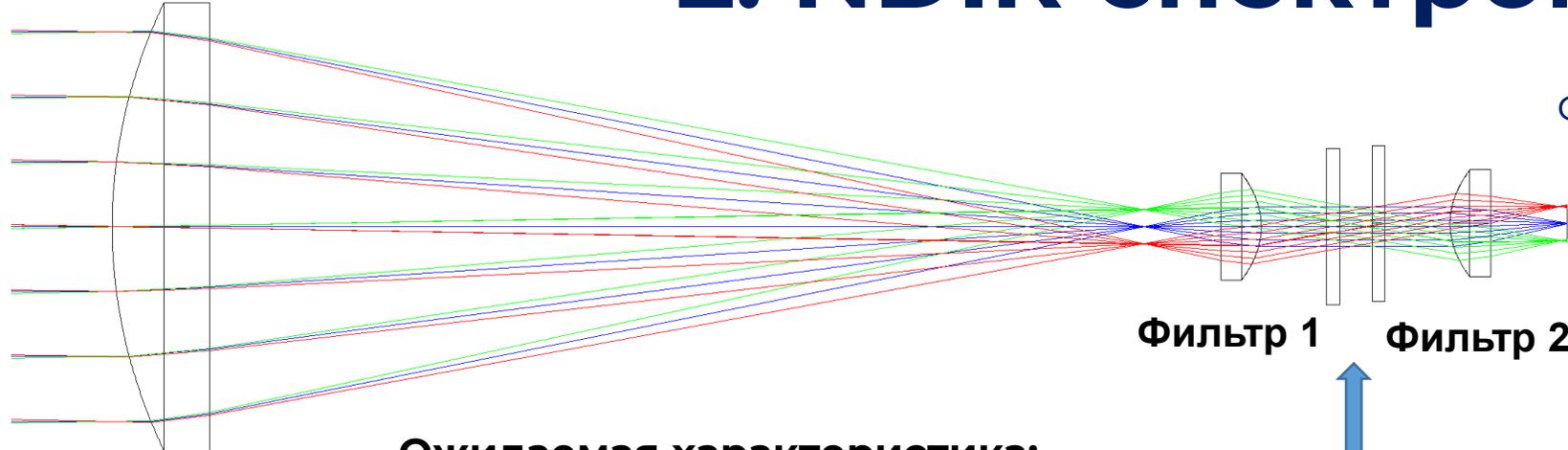
## Технические характеристики

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



# 2. NDIR спектрометр

Телескоп



Форм-фактор Cubsat U16



Ожидаемая характеристика:

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



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

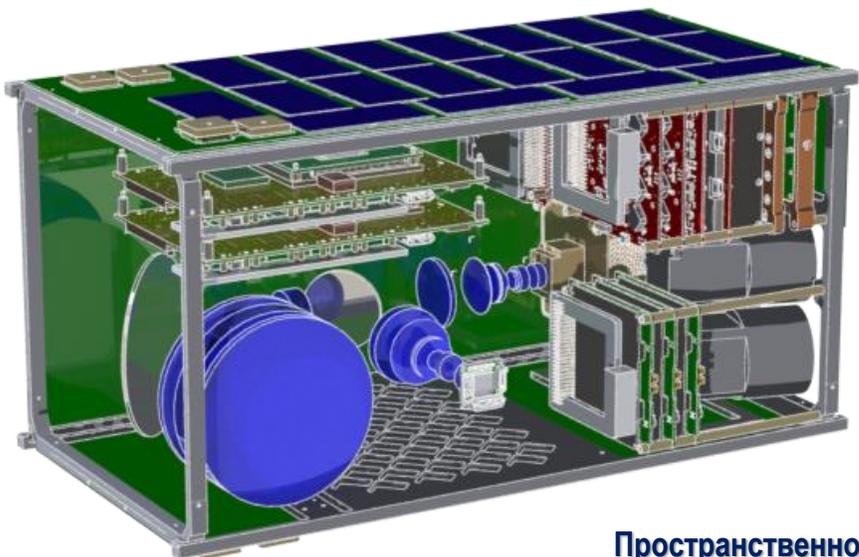
## ОДИН КАНАЛ НА МЕТАН И УГЛЕКИСЛЫЙ ГАЗ

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

## ОПОРНЫЙ КАНАЛ НА КИСЛОРОД

ФПУ на линии  $O_2$ : 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**

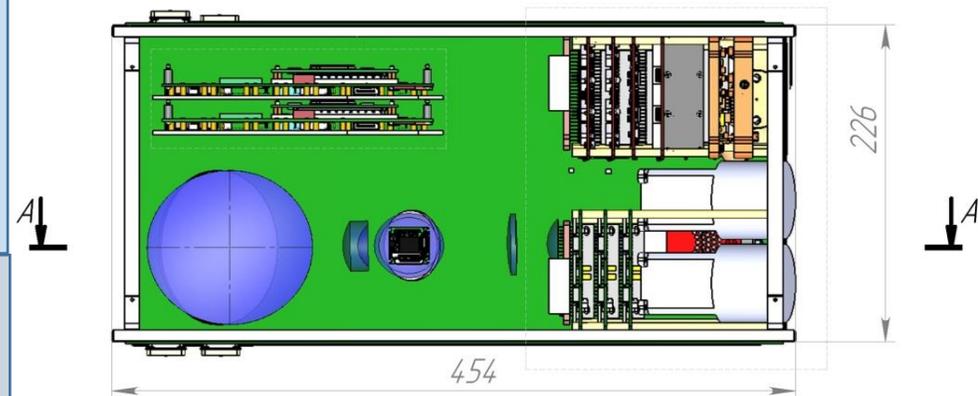


Пространственное разрешение на поверхности Земли **50 x 50 м**

Апертура по входу в систему **100 мм**

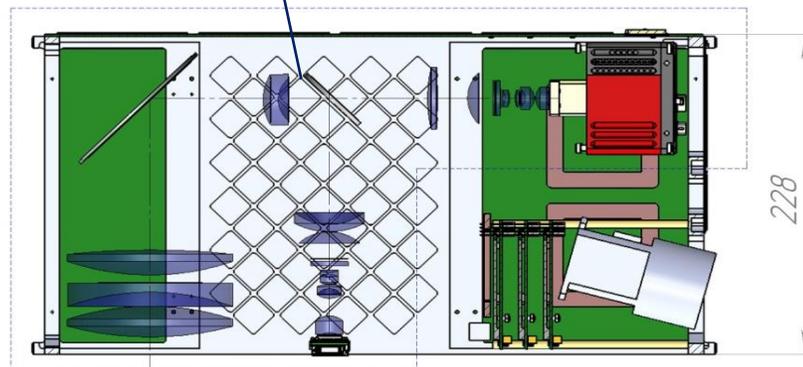
Угловое поле зрения **3,6 x 1,2 град**

Полоса захвата **10 км**



Светоделитель

A - A

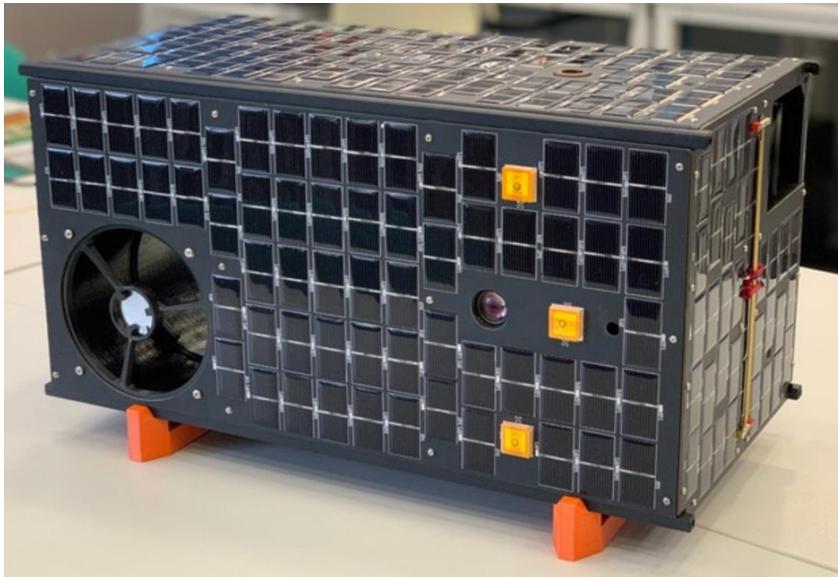


Камера  
Alvium

Камера  
Goldeye

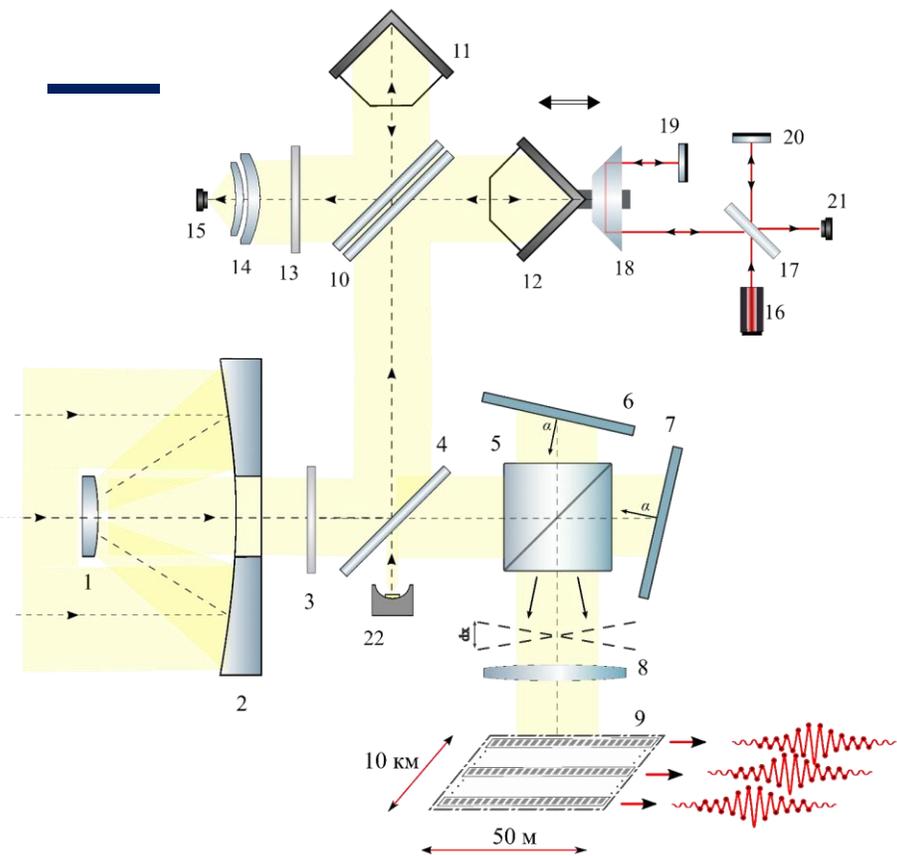
# Ожидаемые характеристики панорамного малогабаритного газоанализатора космического базирования

- информационные линии:
  - $\text{CH}_4$  в области 1,66 мкм ( $6000 \text{ см}^{-1}$ )
  - $\text{CO}_2$  в области 1,60 мкм ( $6225 \text{ см}^{-1}$ )
- опорная линия:
  - $\text{O}_2$  в области 0,765 мкм ( $13072 \text{ см}^{-1}$ )



Параметр		Значение
<b>Основные</b>		
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		$10^{-4} \times 2 \cdot 10^{-2}$
Полоса захвата, км		10
Пространственное разрешение на поверхности Земли, м		50
Полоса обзора, км		100
<b>Габариты, потребление</b>		
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

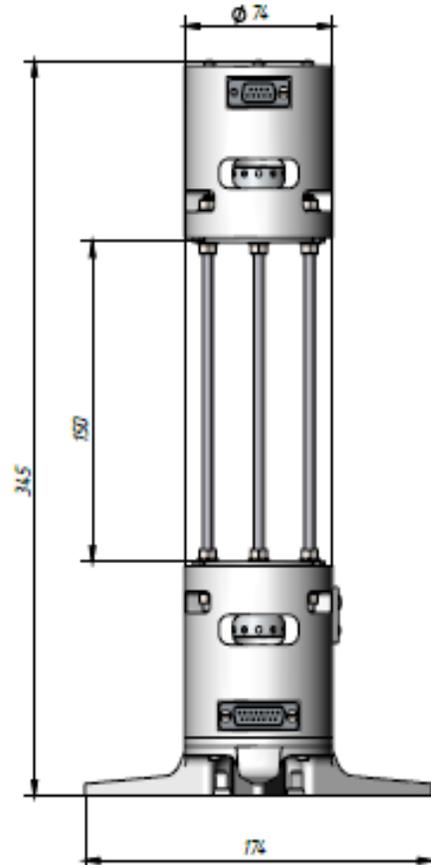
**Ожидаемая характеристика:**

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

## 4. Прибор для измерения концентраций CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O методом недисперсионной спектроскопии с открытой газовой кюветой



Аналог Li-Cor LI-7500

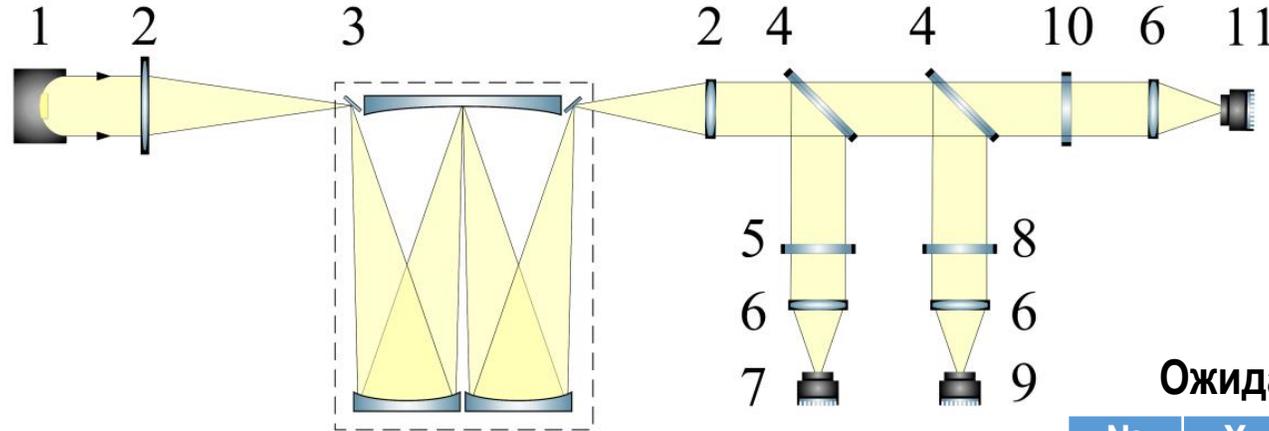


Разрабатываемый прибор

### Технические характеристики газоанализаторов

№ п/п	Характеристика	Единица	Li-7500	ПРИБОР
1	Вещества	-	CO <sub>2</sub> и H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> и H <sub>2</sub> 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 CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub>O 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 N<sub>2</sub>O (4,5-4,7 мкм);
- 11 – канал CH<sub>4</sub> (3,30-3,32 мкм).

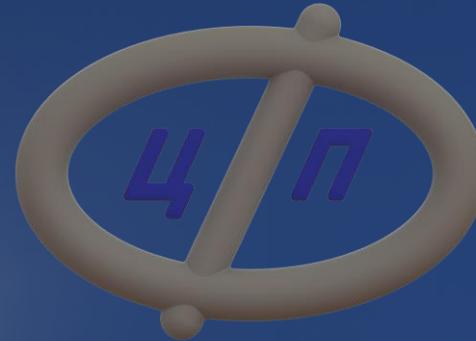
Близкий аналог LI-COR LI7700

## Ожидаемые технические характеристики

№ п/п	Характеристика	Единица	Значение
1	Вещества	-	CH <sub>4</sub> и N <sub>2</sub> O
2	Отношение сигнал/шум	-	10 <sup>5</sup> по CH <sub>4</sub> 10 <sup>6</sup> по N <sub>2</sub> O
3	Чувствительность	ppb	20 по CH <sub>4</sub> 10 по N <sub>2</sub> 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](mailto:igfil@bmstu.ru)