

# Измерительный комплекс самолетного базирования на основе диодных лазеров ближнего ИК-диапазона для непрерывных измерений концентраций метана, углекислого газа, воды и её изотопомеров

А.С. Кузьмичев<sup>1</sup>, А.И. Надеждинский<sup>2</sup>, Д.Б. Ставровский<sup>2</sup>, И.П. Повов<sup>2</sup>, Ю.П. Шаповалов<sup>2</sup>, В.Я. Заславский<sup>2</sup>, Я.Я. Понуровский<sup>2</sup>, В.В. Галактионов<sup>3</sup>, В.У. Хаттатов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> - Московский Физико-Технический Институт, г. Долгопрудный, Московская обл.,

<sup>2</sup> - Институт Общей Физики Российской Академии Наук им.А.М. Прохорова, ул. Вавилова 38, г. Москва, 119991, Российская Федерация

<sup>3</sup> - Центральная Аэрологическая Обсерватория, г. Долгопрудный, Московская обл.



# Введение

На сегодняшний день изменения климата связывают с динамическими процессами на земле и внешними воздействиями, в том числе вызванными деятельностью человека. Одной из основных причин изменения климата многие называют увеличение концентраций основных парниковых газов.

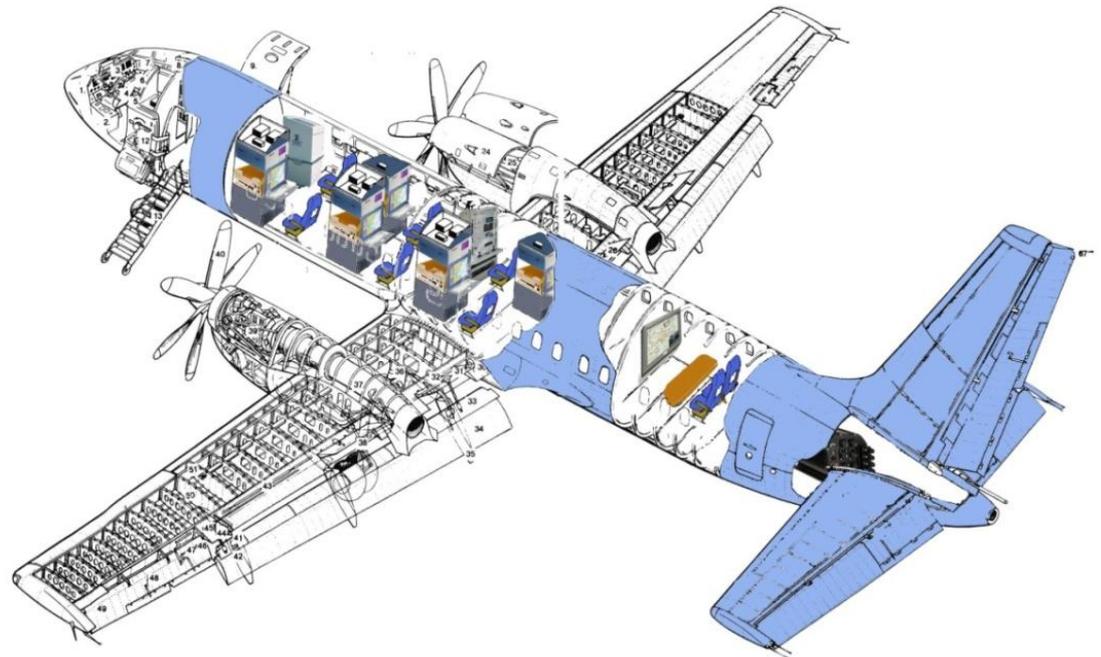
Постоянное измерение концентраций основных парниковых газов  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  крайне важно в свете всеобщего интереса к наблюдениям за климатическими изменениями. Наиболее важными, с точки зрения представительности, как в региональном, так и в глобальном масштабах, является использование самолетов-лабораторий. Самолет-лаборатория, имеющий возможность покрытия больших площадей, в том числе и в труднодоступных регионах, представляет идеальную платформу для изучения пространственно-временных распределений малых концентраций в тропосфере на различных масштабах. Для этих целей создается летающая лаборатория на базе самолета ЯК-42д, одной из задач которой является непрерывное измерение распределения парниковых газов в атмосфере. В качестве измерительных приборов были выбраны лазерные спектрометры, изготовленные на основе диодных лазеров с длинами волн, 1.60, 1.65, 1.39 мкм с волоконным выводом излучения.

В работе будут изложены основные моменты конструкции прибора, рассказано об установке его на борт самолета, а так же приведены некоторые экспериментальные данные, полученные в ходе полевых испытаний.

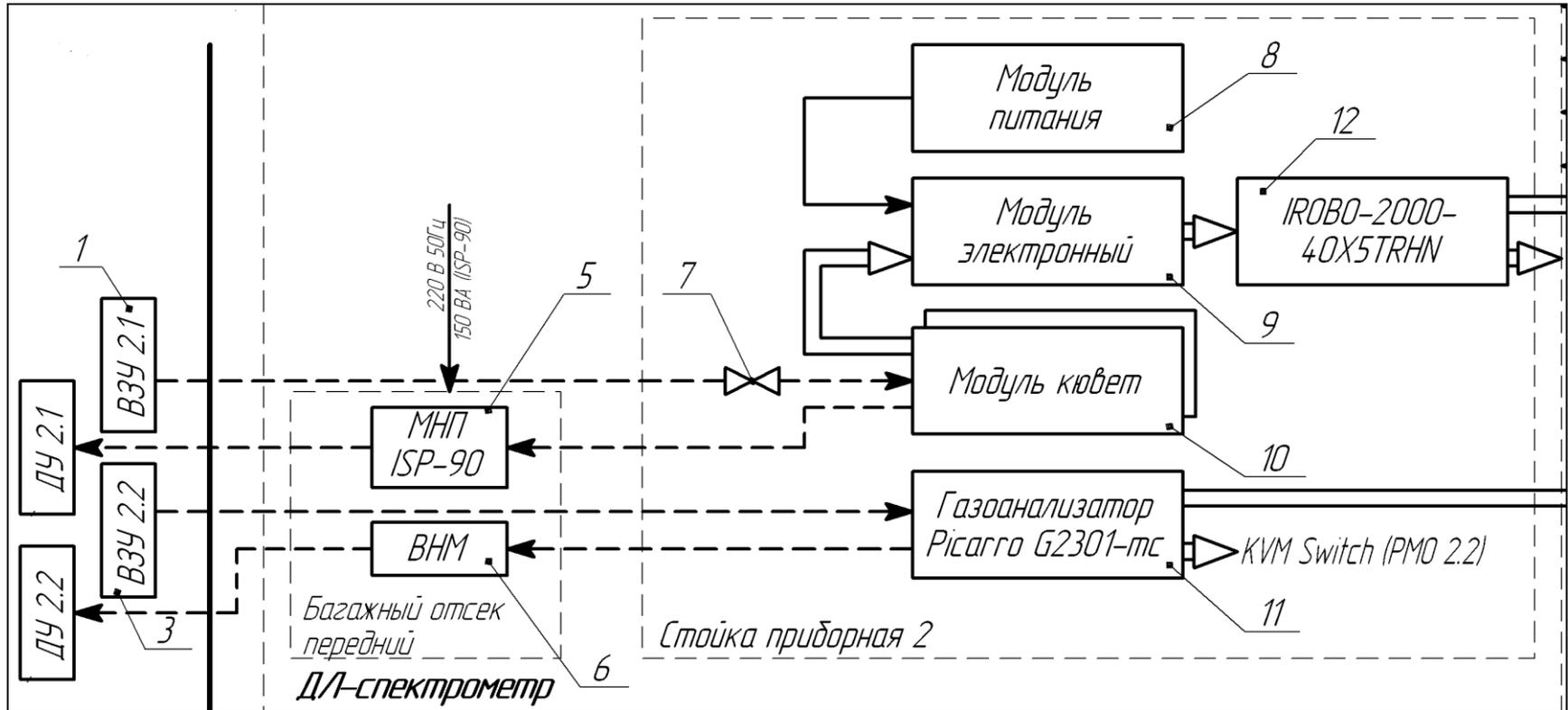
# Самолет-лаборатория



ЯК-42д	
Скорость	730 км/ч
Дальность полета	4100 км
Высота	9.1 км



# Структурная схема размещения модулей на борту самолета

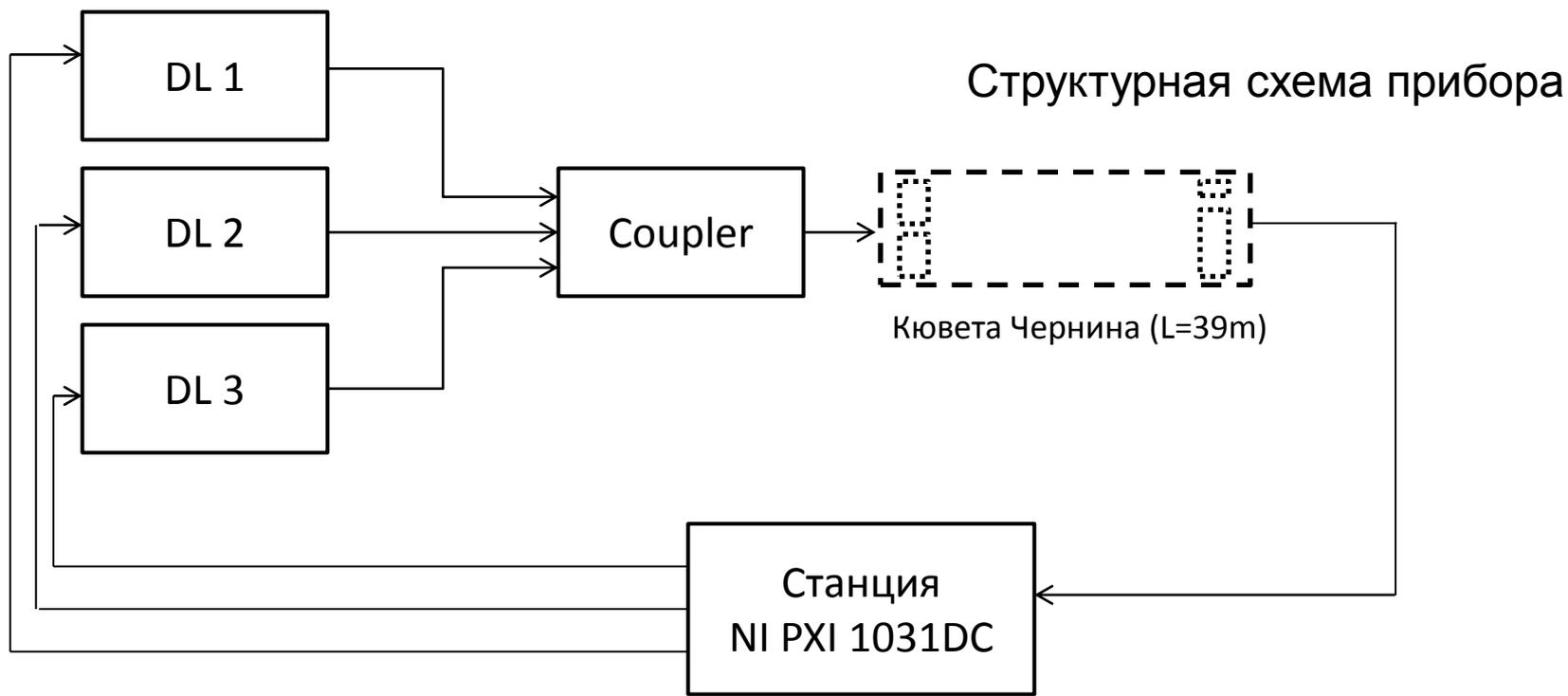


# Основные характеристики самолетного спектрометра Picarro

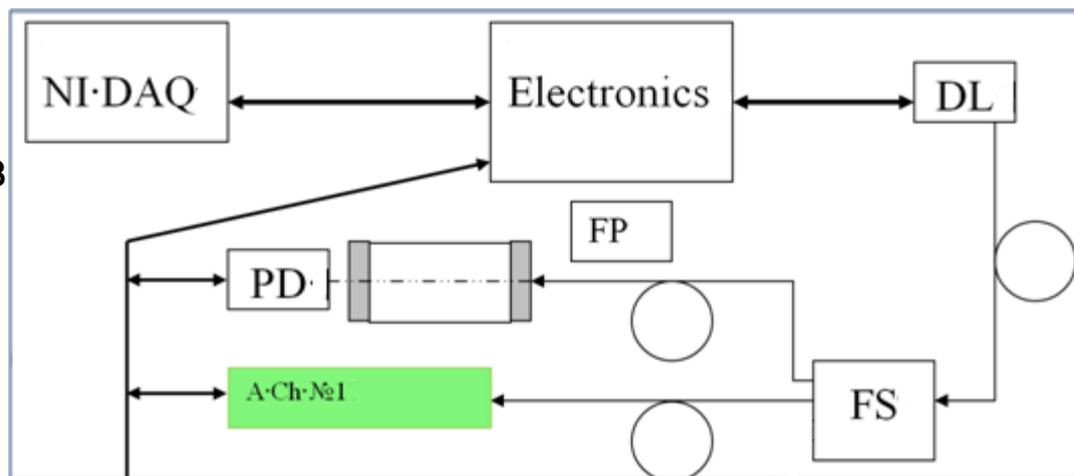
Performance Specifications, in air			
Parameter	CO <sub>2</sub> Specification	CH <sub>4</sub> Specification	H <sub>2</sub> O Specification
Precision (1-σ over 30 secs, vibration @ 20 Hz, 1g):	< 200 ppbv	< 1.5 ppbv	< 100 ppmv
Drift at STP (Peak to peak of 300 second average):	< 200 ppbv over 30 hours	< 1.5 ppbv over 30 hours	< 100 ppmv + 5% of reading
Drift with Changing Temp (30 second peak to peak over 3 hrs; 15°C/hr within range 10-35°C):	< 7.5 ppbv/°C	< 0.05 ppbv/°C	N/A
Drift with Changing Pressure (30 sec peak to peak over 3 hrs; <1.4 Torr/sec in range 250 – 760 Torr):	< 700 ppbv	< 7.5 ppbv	N/A
Operating Range	300 ppm to 700 ppm	300 ppb to 2,600 ppb	0 – 2.5%
Measurement Interval (Mode 1)	< 2.5 seconds	< 2.5 seconds	< 1 minute
Measurement Interval (Mode 2)	< 5 seconds	< 5 seconds	< 5 seconds
Rise/Fall time (10-90%/90-10%)	< 2.0 seconds	< 2.0 seconds	N/A

Однако существует один важный недостаток! Этот прибор не сможет обеспечить измерение концентраций различных изотопомеров паров воды.

# Блок-схемы ДЛ-спектрометра



Блок схема одного из модулей прибора



# ДЛ-комплекс для самолета-лаборатории

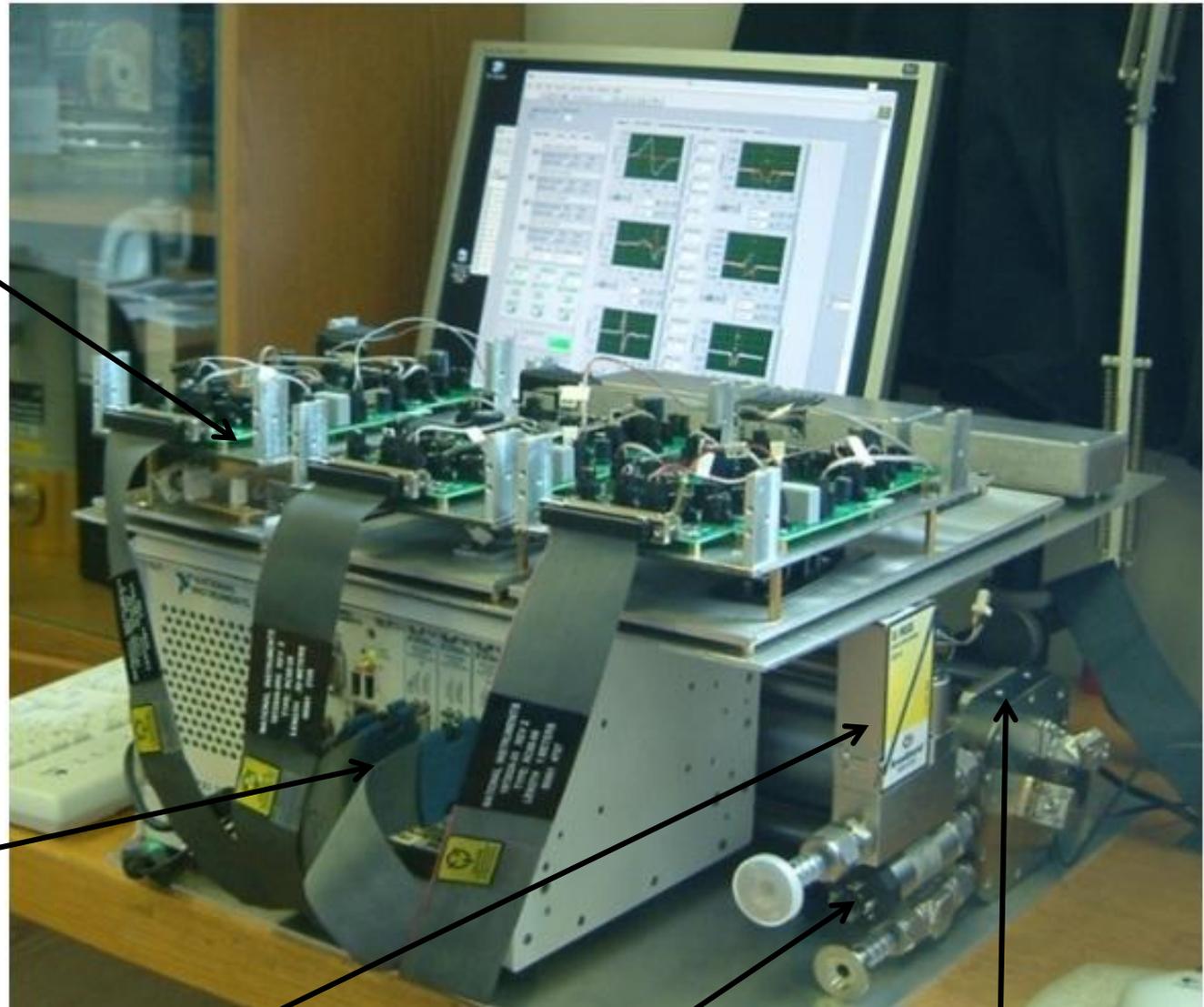
Электронный  
модуль (высота 10  
см, длина 42 см,  
ширина 46 см)

Кюветный модуль  
(высота 25 см,  
длина 42 см,  
ширина 46 см)

Стабилизатор  
давления

Датчик давления

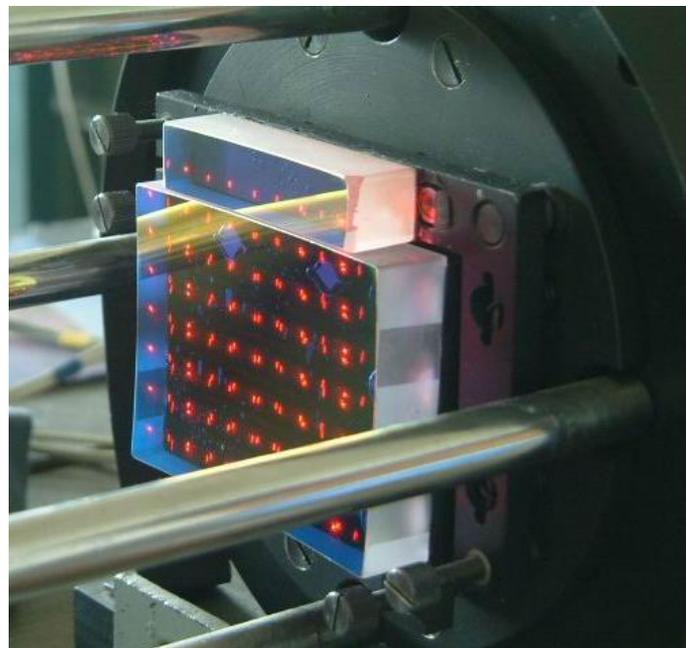
Кювета Чернина



# Кювета Чернина



Многоходовая  
вакуумируемая кювета с  
базой 25см и общей  
длиной оптического пути  
39 метров

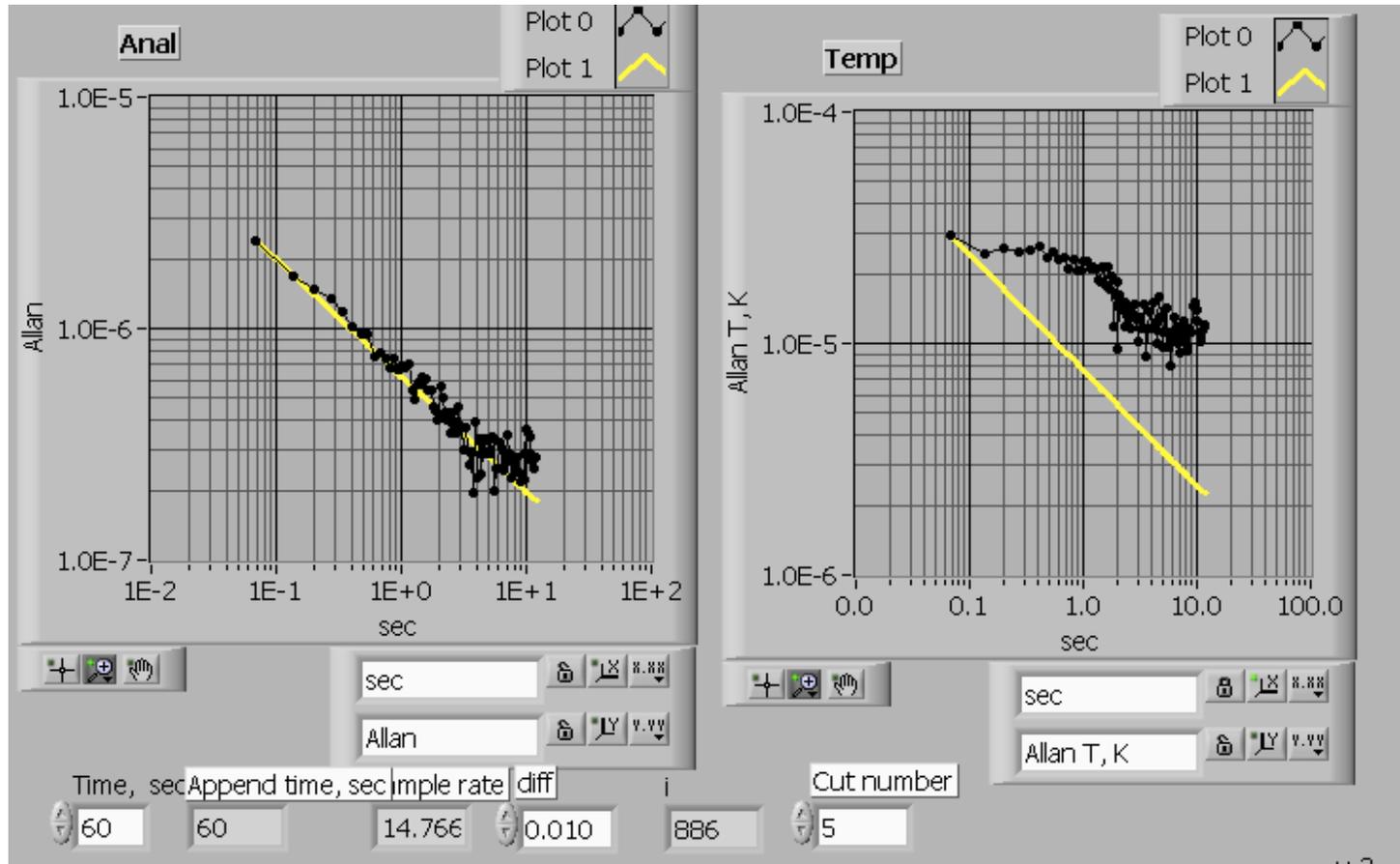


Матрица изображений



Ход лучей

# Шумы оптоэлектронного тракта ДЛС



Функция Allan-std (черные точки графика) определяет величины шумов оптоэлектронного тракта системы в зависимости от времени накопления. Желтые линии – расчетная Allan-std при заданной величине шумов дискрета ЦАП/АЦП - платы. Минимально детектируемое поглощение при времени усреднения 5 сек. достигает величины  $3 \cdot 10^{-7}$ . В реальных измерениях необходимо учитывать изменения базовой линии ДЛ, приводящей к уменьшению чувствительности.

# Пробоподготовка



Воздух за бортом самолета

Стабилизация Т



Воздух с температурой, близкой с температуре в салоне

Стабилизация Р



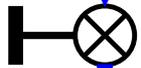
Стабилизация давление воздуха до  $P = 48 \text{ mBar}$

Кювета  
Чернина

Р

Измерение давления и температуры в кювете Чернина

Т



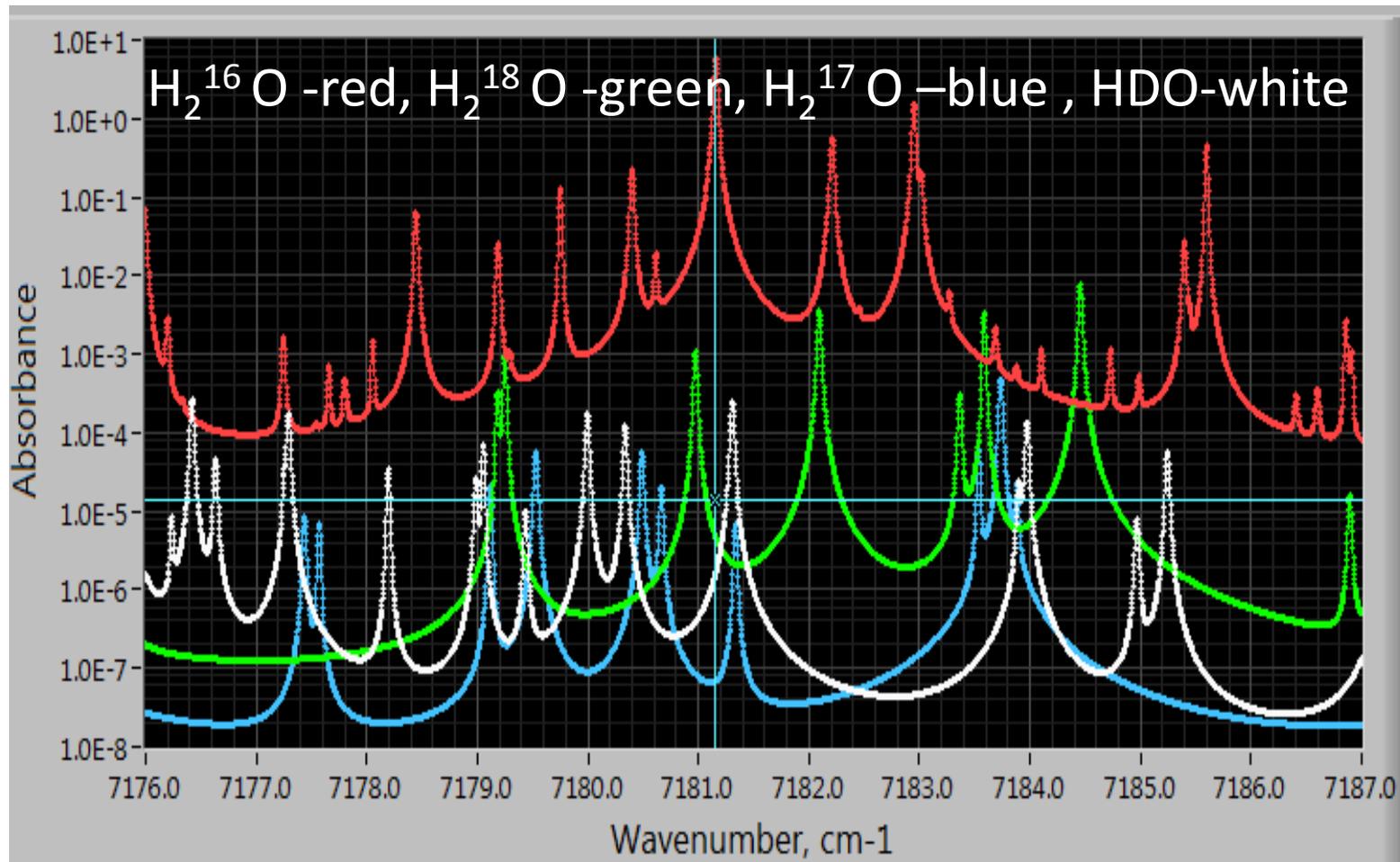
Скорость потока 0.2 л/сек

Насос



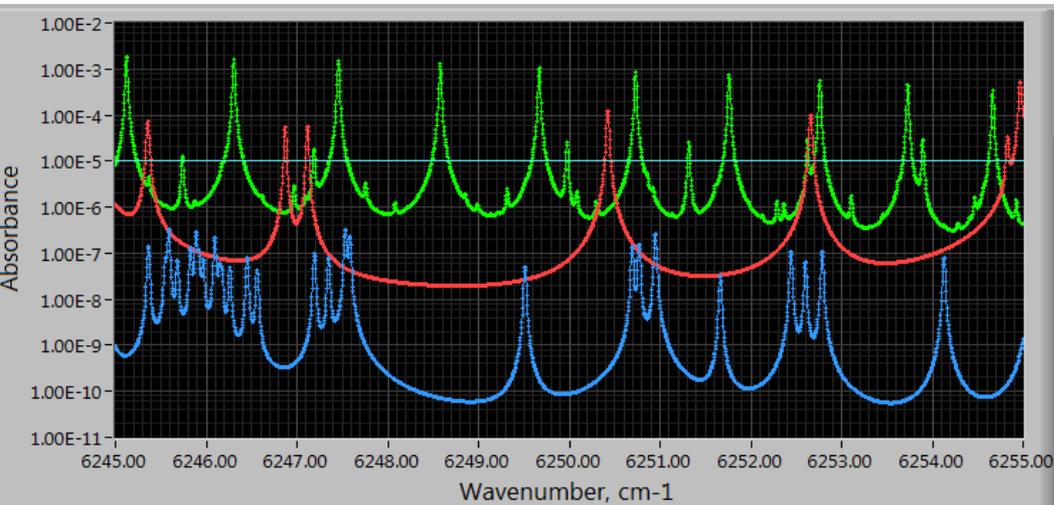
Цель модуля пробоподготовки- подготовка заборного воздуха для измерений и контроль давления и температуры.

# Выбор рабочих спектральных диапазонов для изотопомеров H<sub>2</sub>O



Моделирование сделано при условиях: L=40m, P=100mBar, C=1700ppm  
Концентрация 1700 ppm соответствует высоте 6 км от поверхности Земли

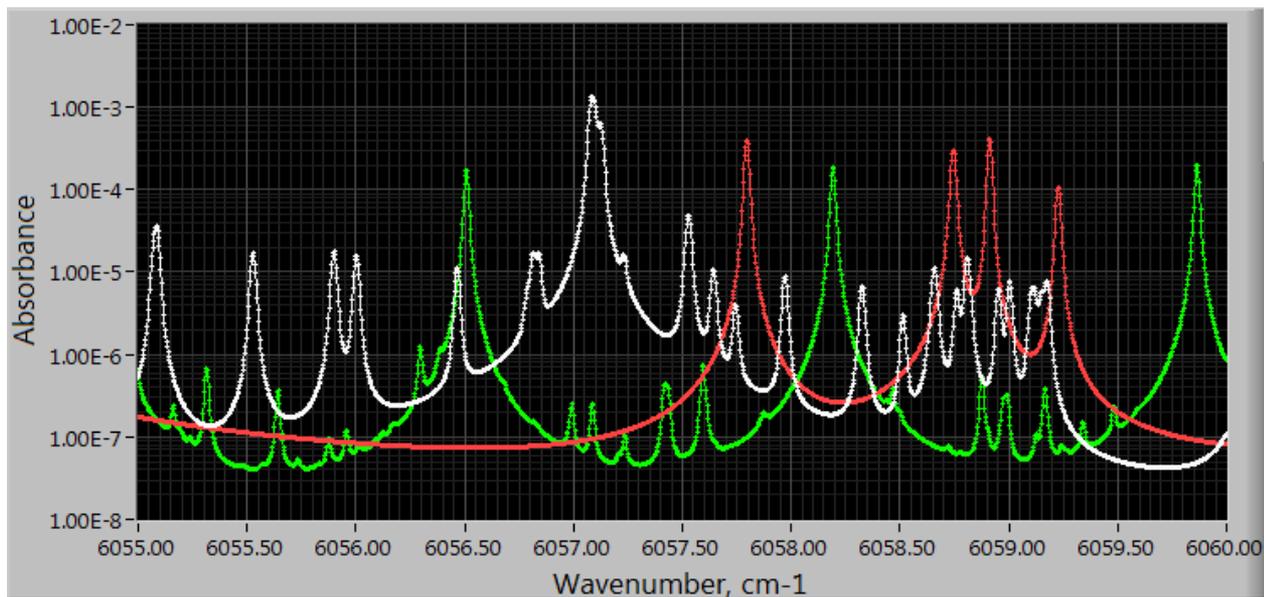
# Выбор рабочих спектральных диапазонов для CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub>



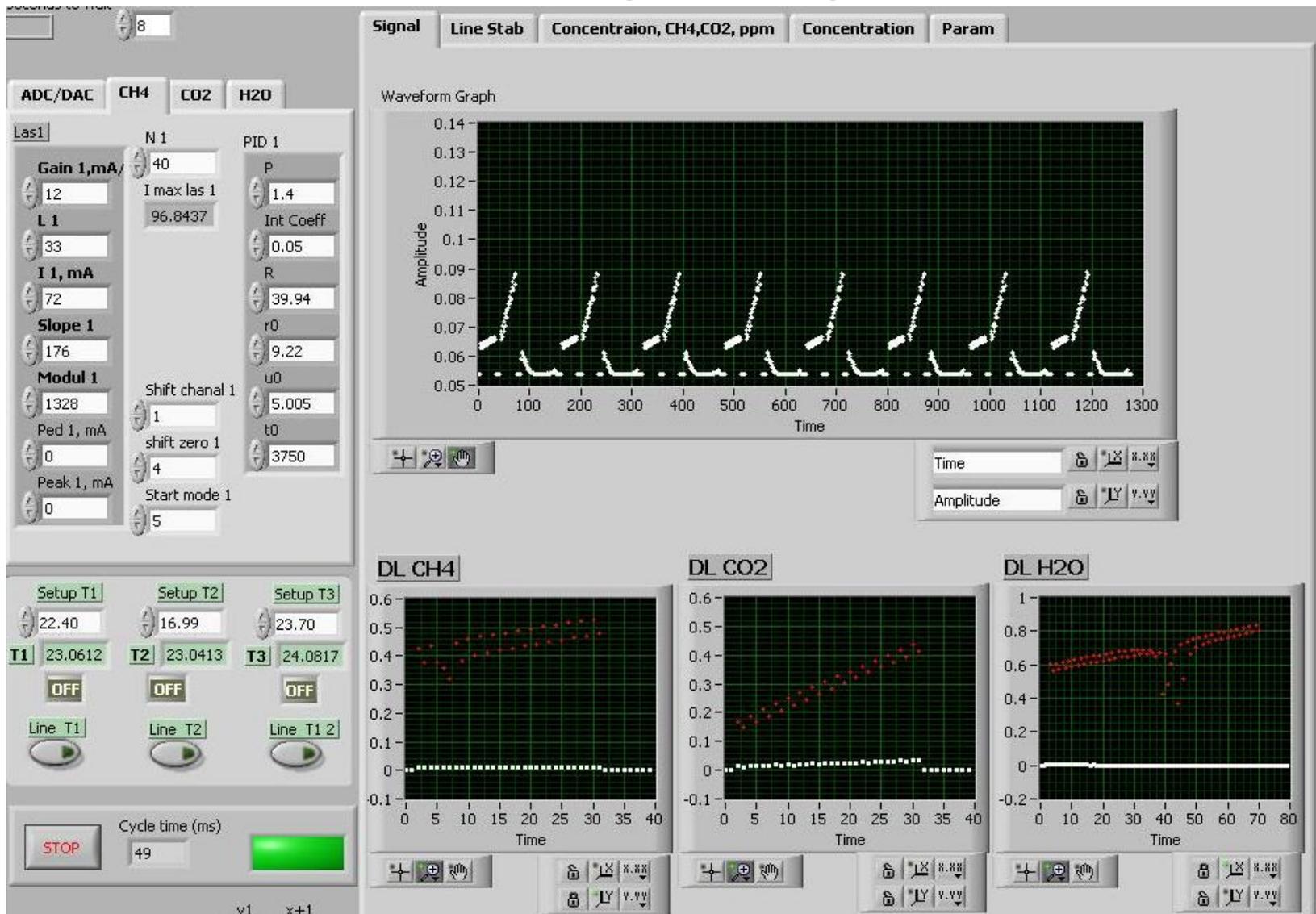
Параметры: L = 40 m, P = 100 mBar, синий - CH<sub>4</sub> (1.8 ppm), красная - H<sub>2</sub>O (15000 ppm), зеленая - CO<sub>2</sub> (365 ppm).

Аналитическая линия для CO<sub>2</sub>-6248.5779 cm<sup>-1</sup>

Параметры: L = 40 m, P = 100 mBar, белый - CH<sub>4</sub> (1.8 ppm), красная - H<sub>2</sub>O (15000 ppm), зеленая - CO<sub>2</sub> (365 ppm). Аналитическая линия для CH<sub>4</sub>- 6057.08 cm<sup>-1</sup>

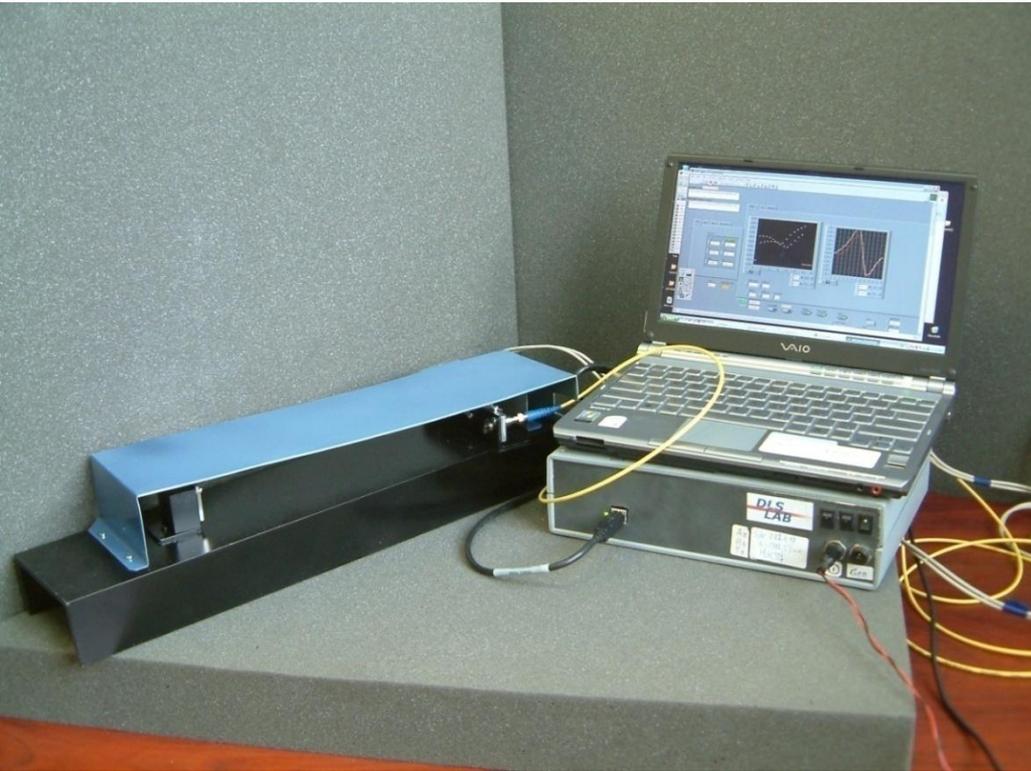


# Интерфейс программы управление ДЛ-спектрометром



# Измерение концентрации паров воды на открытой трассе

Фотография газоанализатора для измерения концентраций паров воды. Открытая кювета 50см.



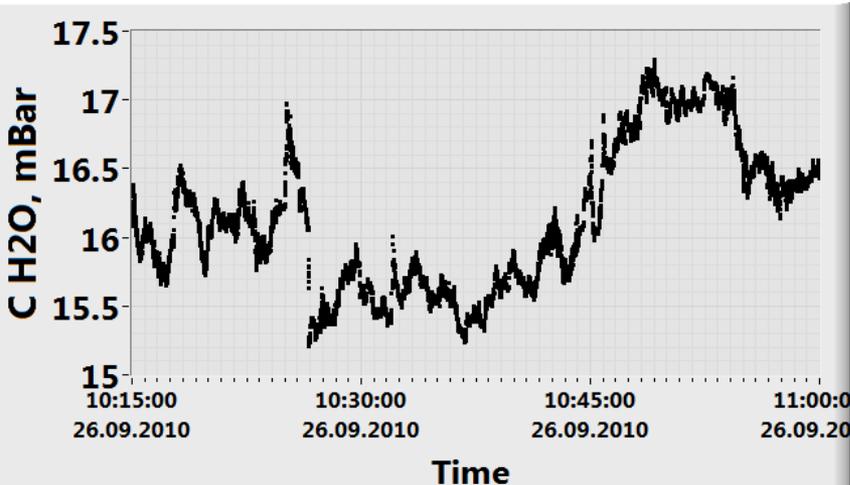
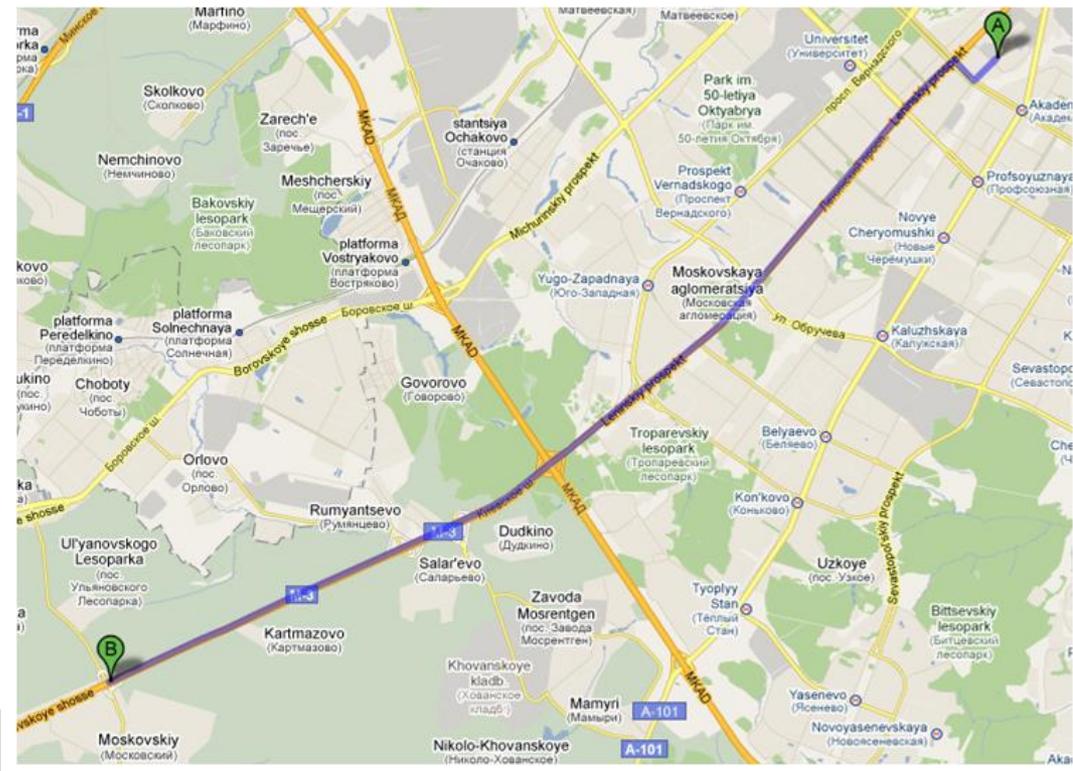
Кювета закреплялась на крыше автомобиля, через окно которого протягивалось волокно и кабель от фотоприемника



# Экспериментальные измерения

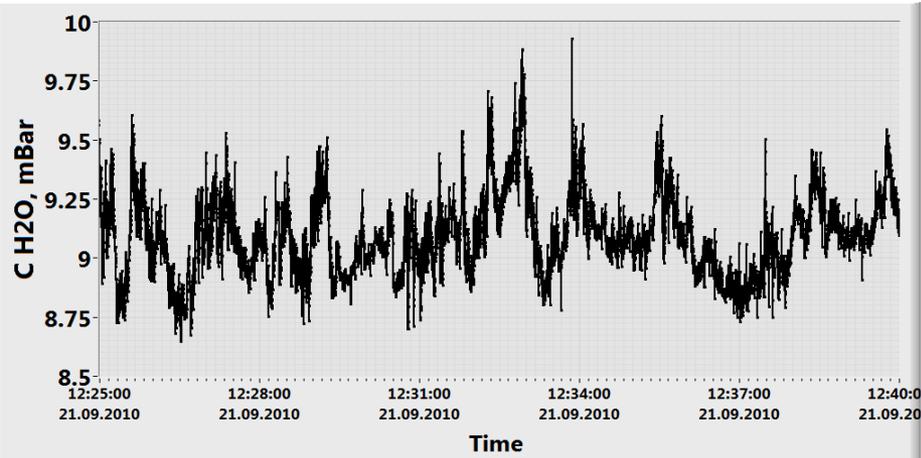
Весной 2011 и осенью 2010 года были проведены серии полевых испытаний.

Поездка 09/26/2010.  
Движение по Ленинском проспекту и Киевскому шоссе. Точка А – ИОФ РАН, точка В – разворот у поселка Московский. Расстояние в одну сторону около 40 км. Синим показана траектория движения.



Распределение концентраций паров воды за пределами МКАДа.

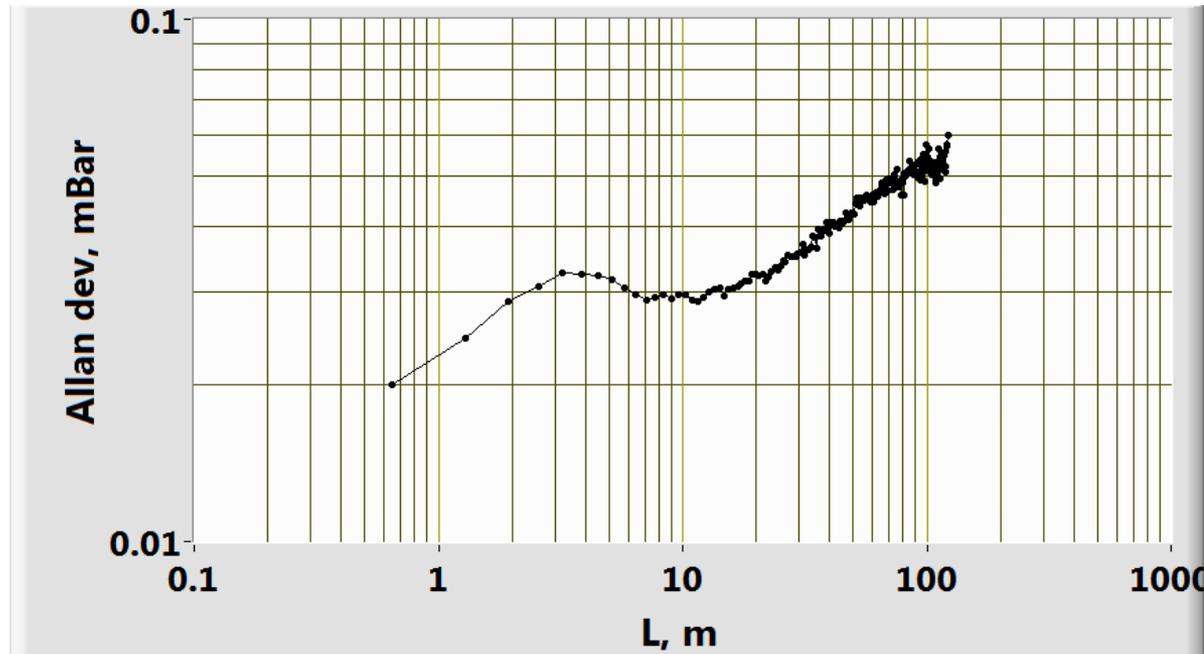
# Полевые измерения масштаба неоднородности



Фрагмент записи концентрации воды, использованный для построения зависимости Аллана.

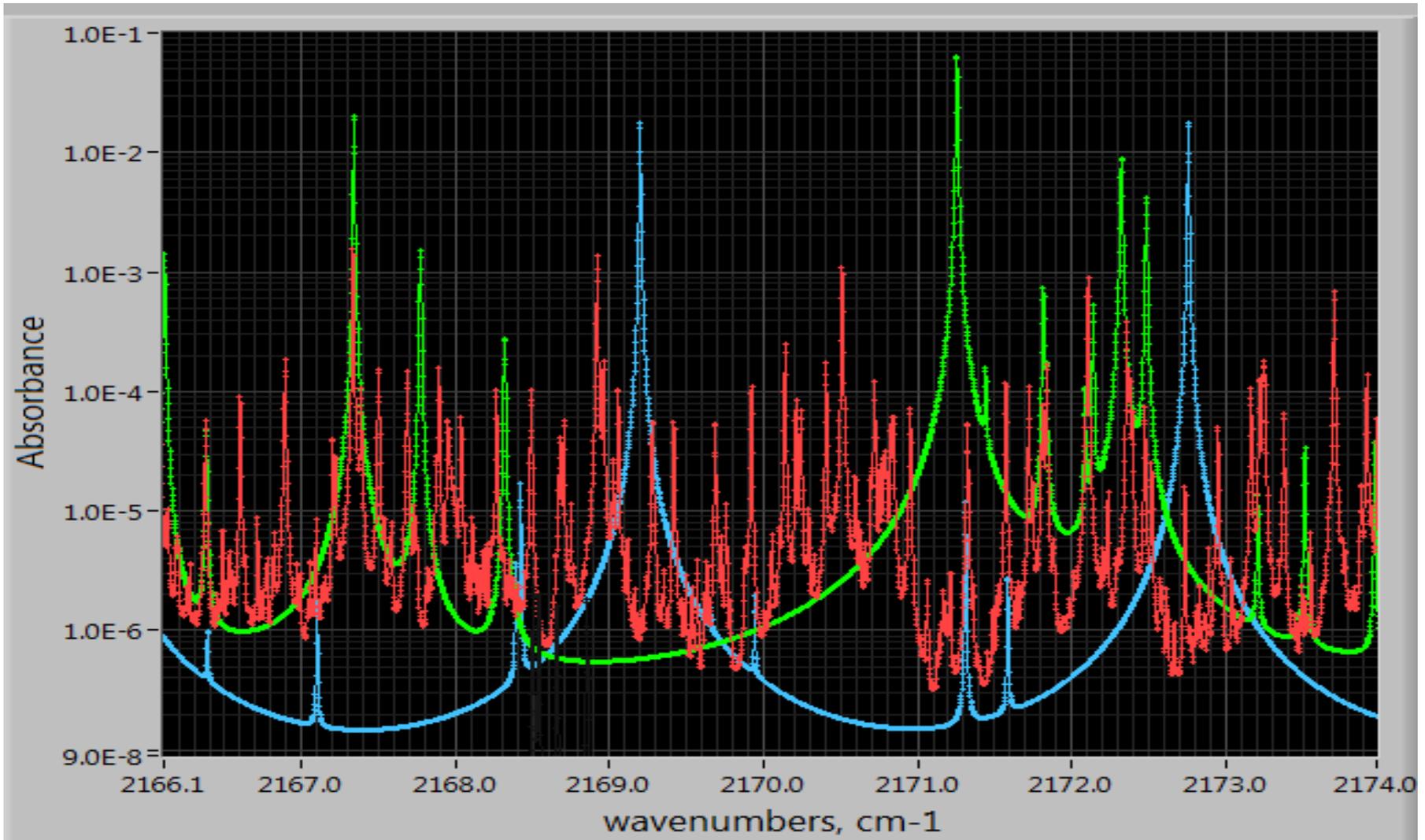
Давление паров воды постоянно, за исключением неоднородностей, которые и предлагается определять с помощью графика Аллана.

Для получения этой зависимости использовались данные gps-навигатора для перевода временной зависимости в пространственную.



Сглаженный пик можно наблюдать на расстоянии около 3-4 метров, он обусловлен расстоянием между автомобилями.

# Измерение CO



Параметры: L = 40 m, P = 100 mBar

голубой - CO (0.18 ppm), зеленый - H<sub>2</sub>O (15000 ppm), красная - CO<sub>2</sub> (365 ppm)

Аналитическая линия для CO- 2169.08 cm<sup>-1</sup> (4.56 мкм)

# Выводы

1. Создан опытный образец многоканального ДЛ-комплекса для измерения концентрации парниковых газов  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и его изотопомеров с борта самолета
2. Разработана схема размещения комплекса на борту самолета
3. Протестированы электронные узлы в условиях вибраций
4. Отработана методика измерений концентраций
5. Проведены полевые измерения концентраций водяного пара в г. Москве с целью определения характерного масштаба неоднородности атмосферы