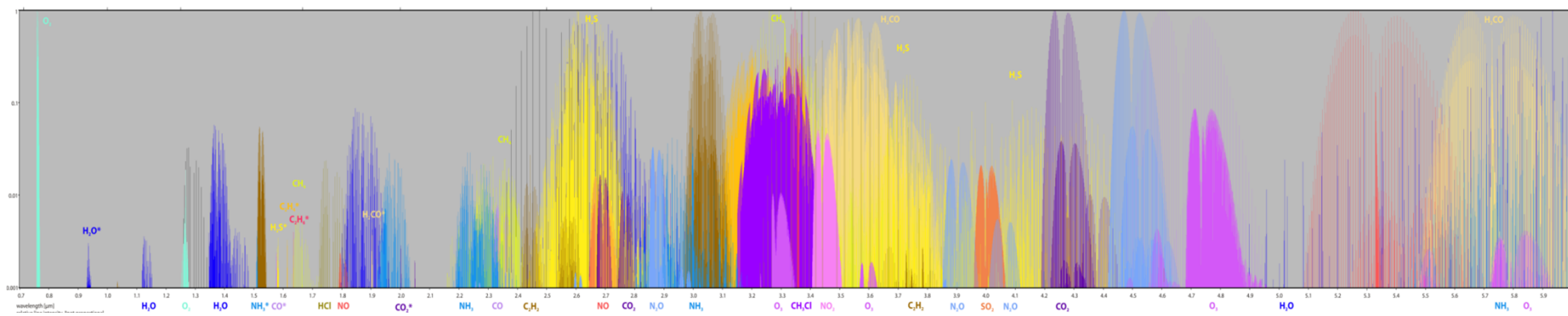


# Лазерная и гетеродинная спектроскопия сверхвысокого разрешения

А.В.Родин, В.М.Семенов, А.Ю.Климчук, С.Г.Зеневич

Лаборатория прикладной инфракрасной спектроскопии МФТИ



# Что такое лазерная спектроскопия

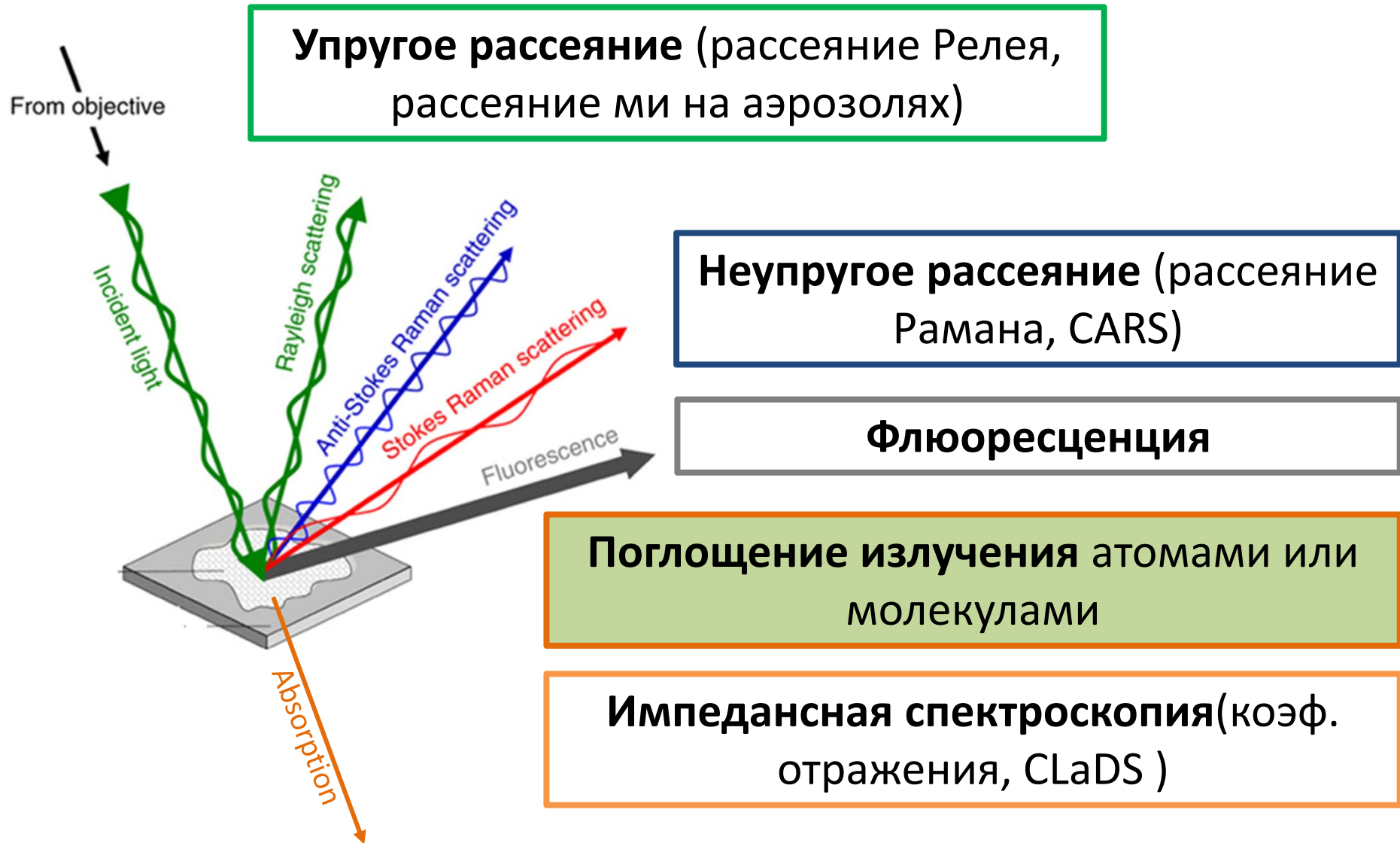
---

Many of the modern spectroscopic methods involve one or several lasers and are then called *laser spectroscopy*  
*rp-photonics encyclopedia*

The invention and subsequent development of the *laser* opened many new areas of *spectroscopy*  
*Britannica*

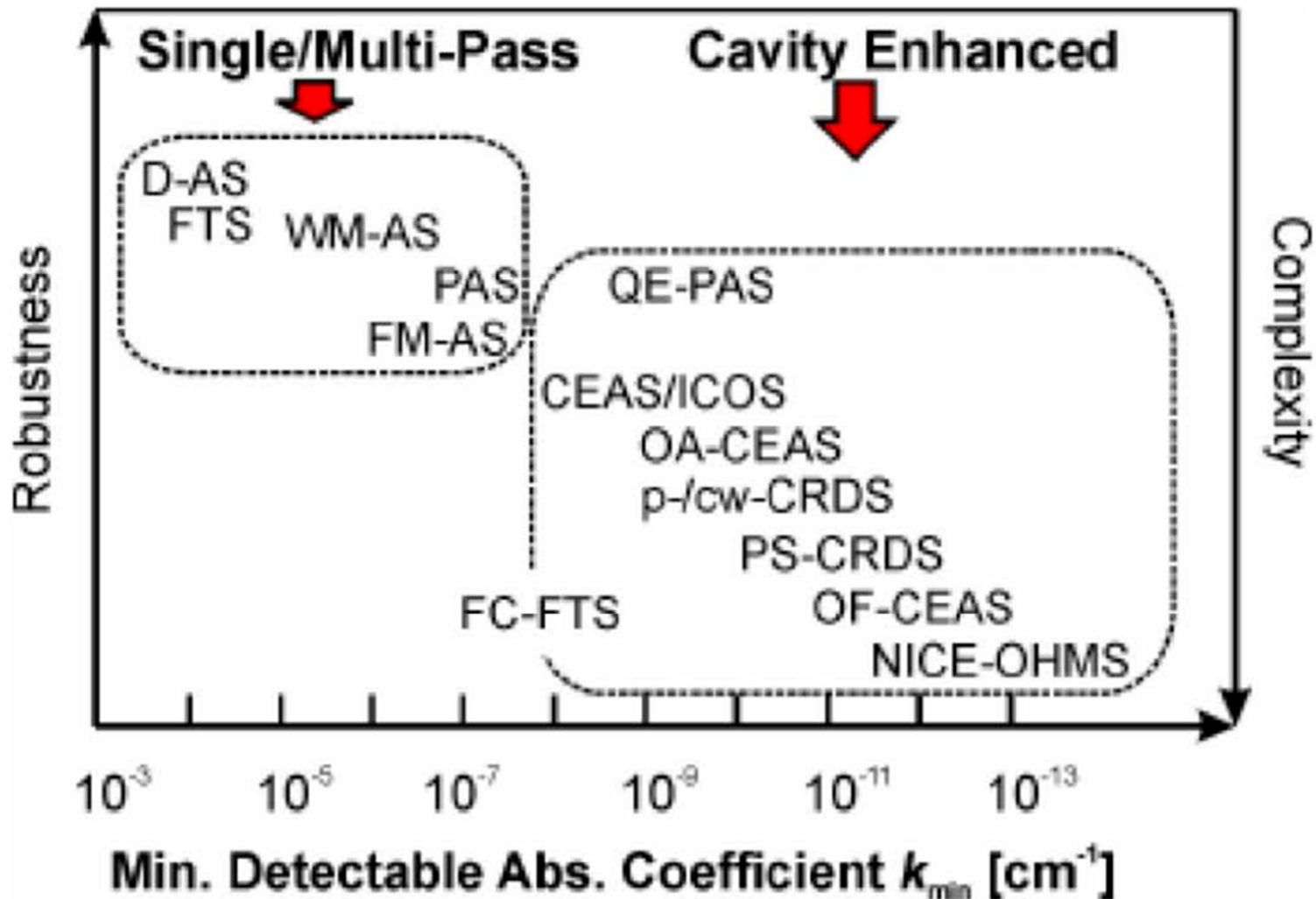
**Любая спектроскопическая техника, в которой  
используется лазерное излучение**

# Природа взаимодействия





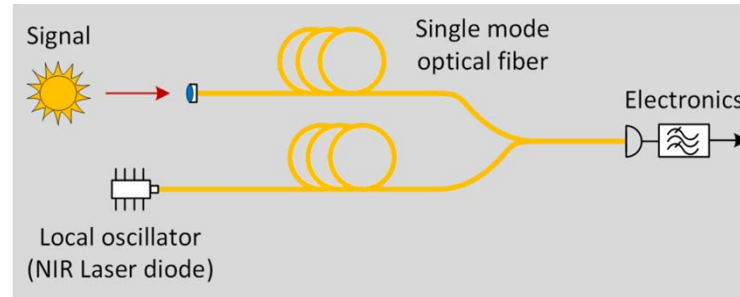
# Методы лазерной спектроскопии



# Гетеродинная спектроскопия

$$E_s = \int_0^{\infty} E_{\omega} \exp[-i\omega t] d\omega$$

$$E_{lo} = E_{lo} \exp[-i\omega_{lo} t]$$

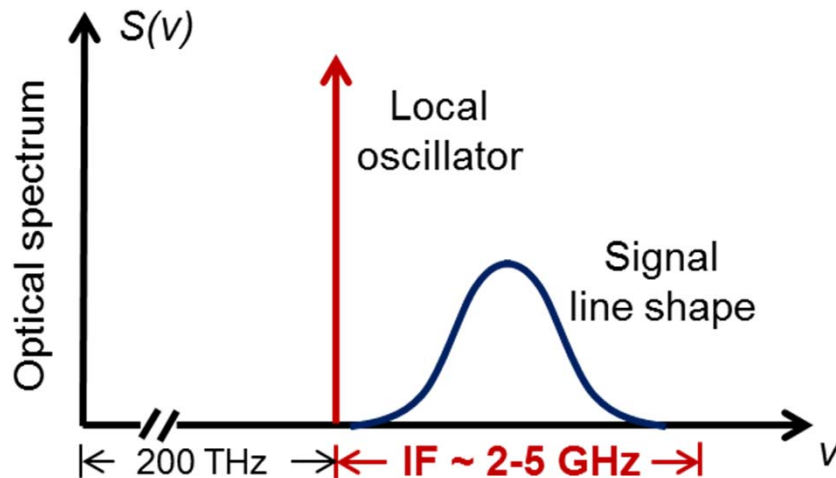


$$i = K \cdot |\vec{E}_{lo} + \vec{E}_s|^2 = K \cdot [ |E_{lo}|^2 + [\vec{E}_{lo}\vec{E}_s^* + \vec{E}_{lo}^*\vec{E}_s] + |E_s|^2 ]$$

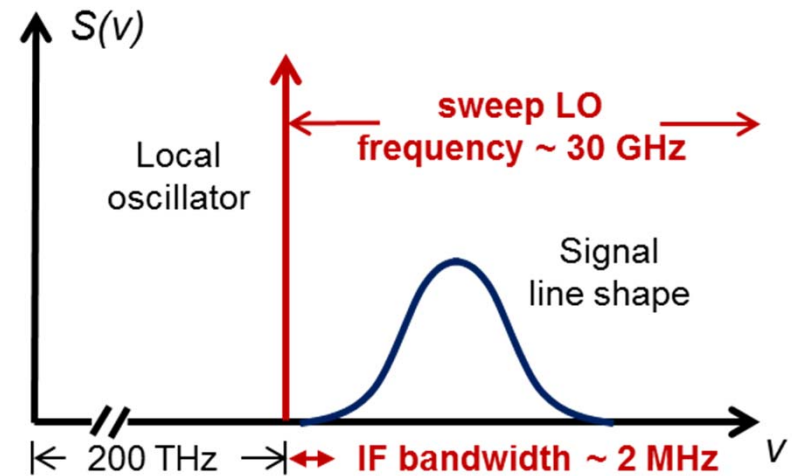
Beat note signal:

$$[\vec{E}_{lo}\vec{E}_s^* + \vec{E}_{lo}^*\vec{E}_s] = 2 \int_0^{\infty} E_{lo} E_{\omega} \exp[-i(\omega_{lo} - \omega) \cdot t] d\omega + CC$$

Общепринятый подход:

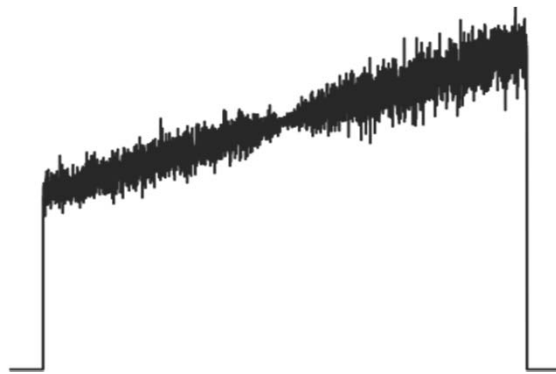


Наш подход:

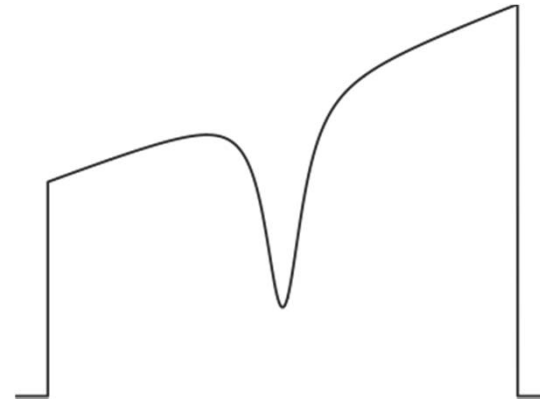


# Гетеродинный сигнал:

1.

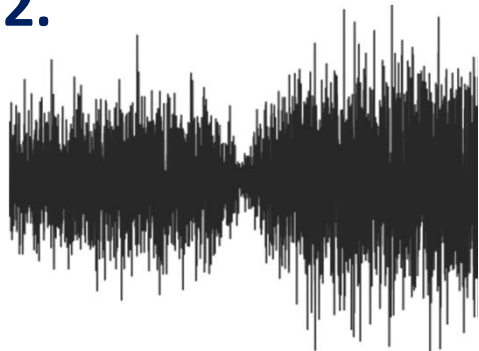


гетеродинный  
спектрометр



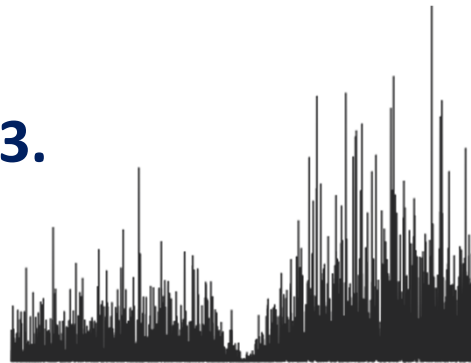
спектрометр  
прямого поглощения

2.



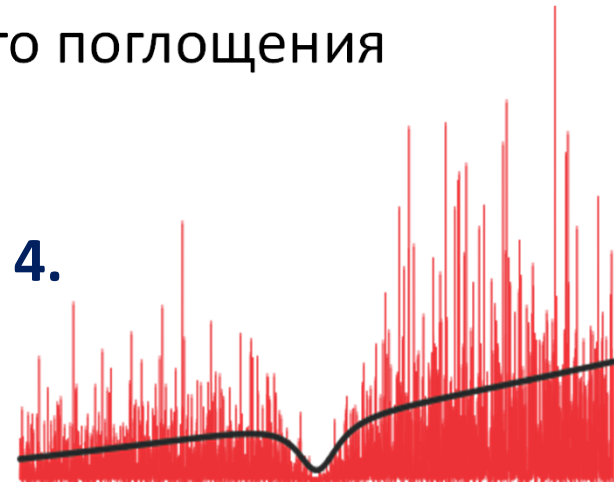
убрать «базовую  
линию»

3.



возвести в квадрат

4.

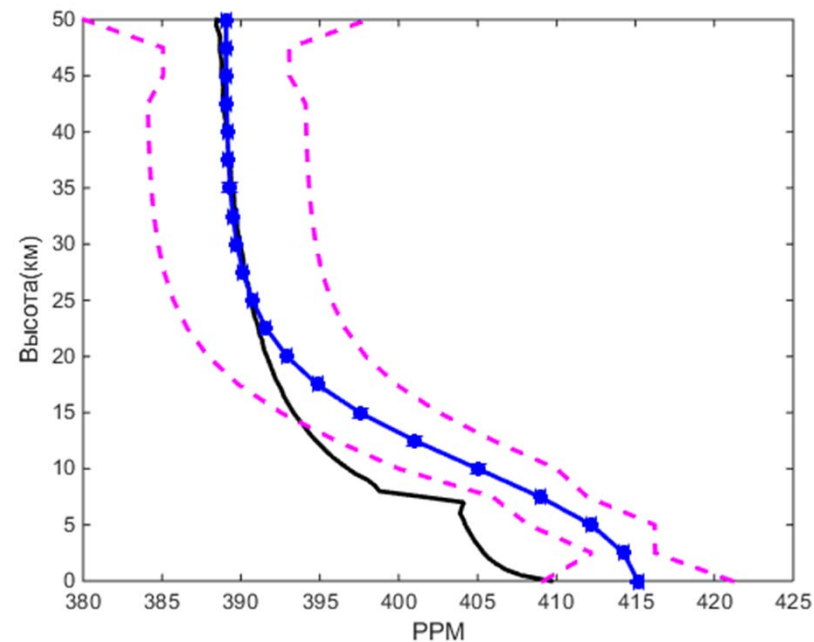
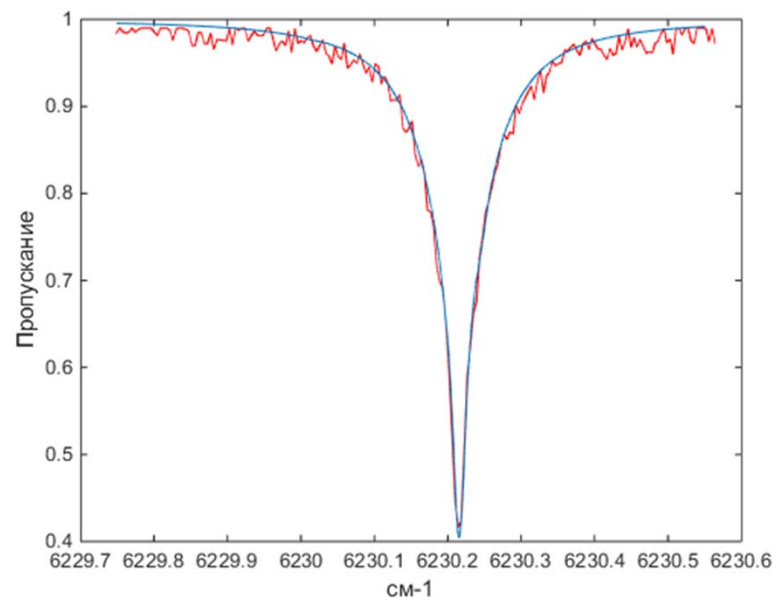


сгладить и накопить

# Наблюдения атмосферы



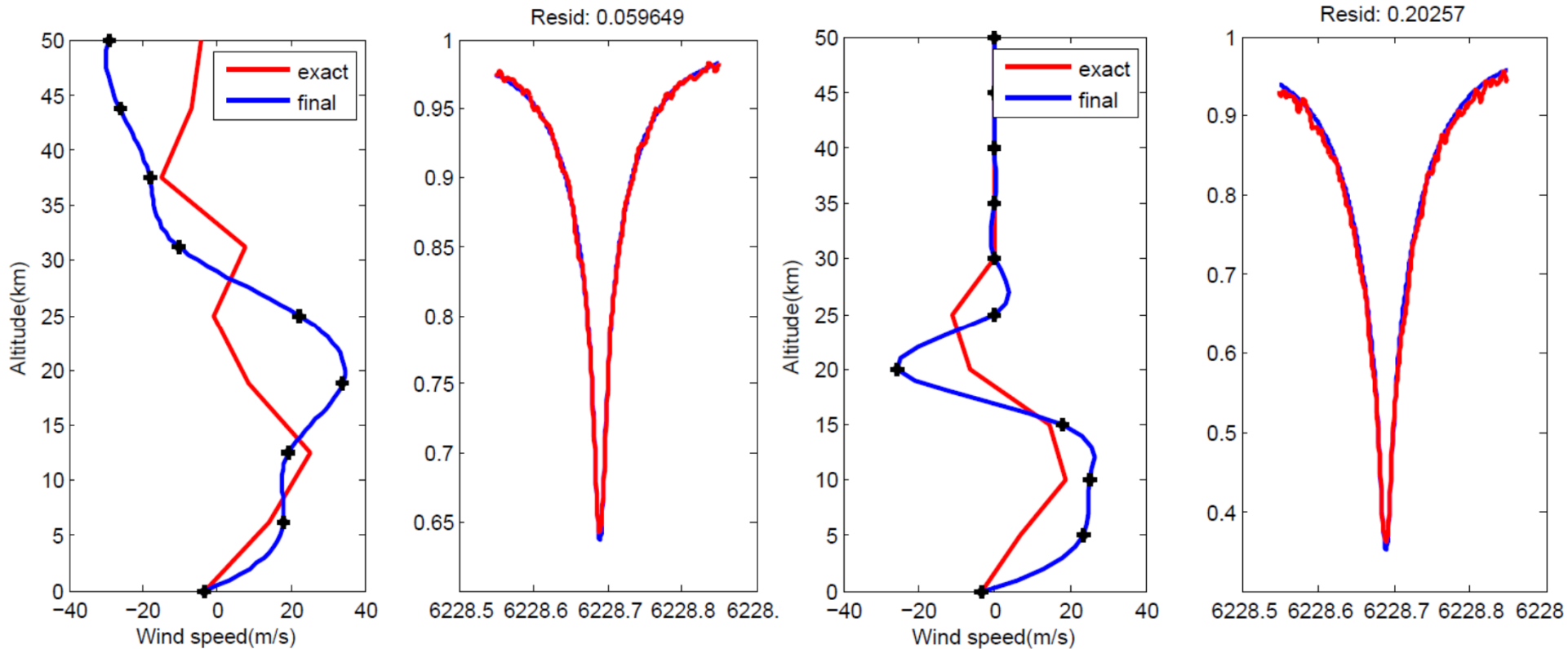
# Спектр солнечного излучения в линии поглощения CO<sub>2</sub> в области 1.58 мкм



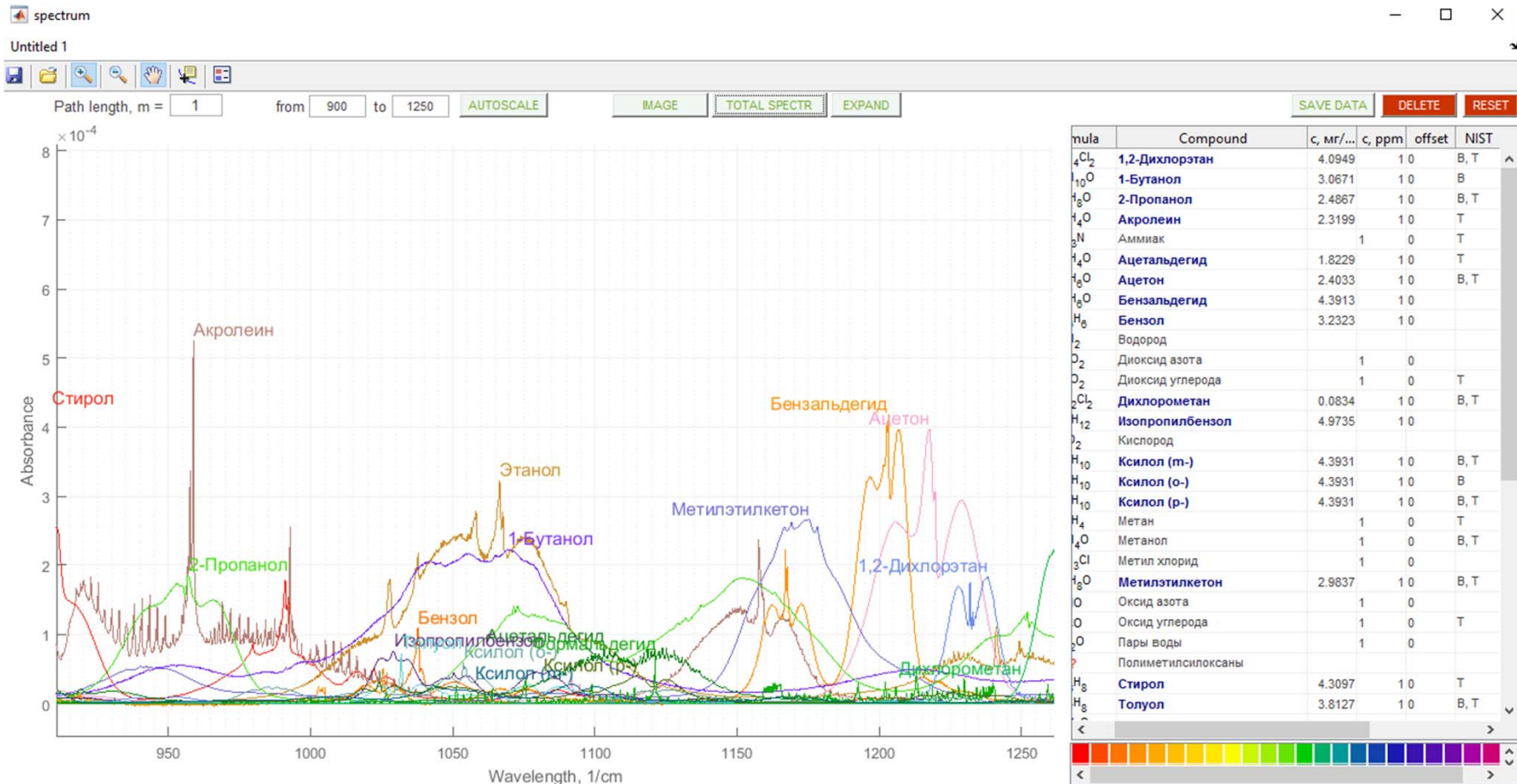
Восстановленный профиль CO<sub>2</sub>  
с субпроцентной точностью

# Прямые доплеровские измерения скоростей воздушных потоков

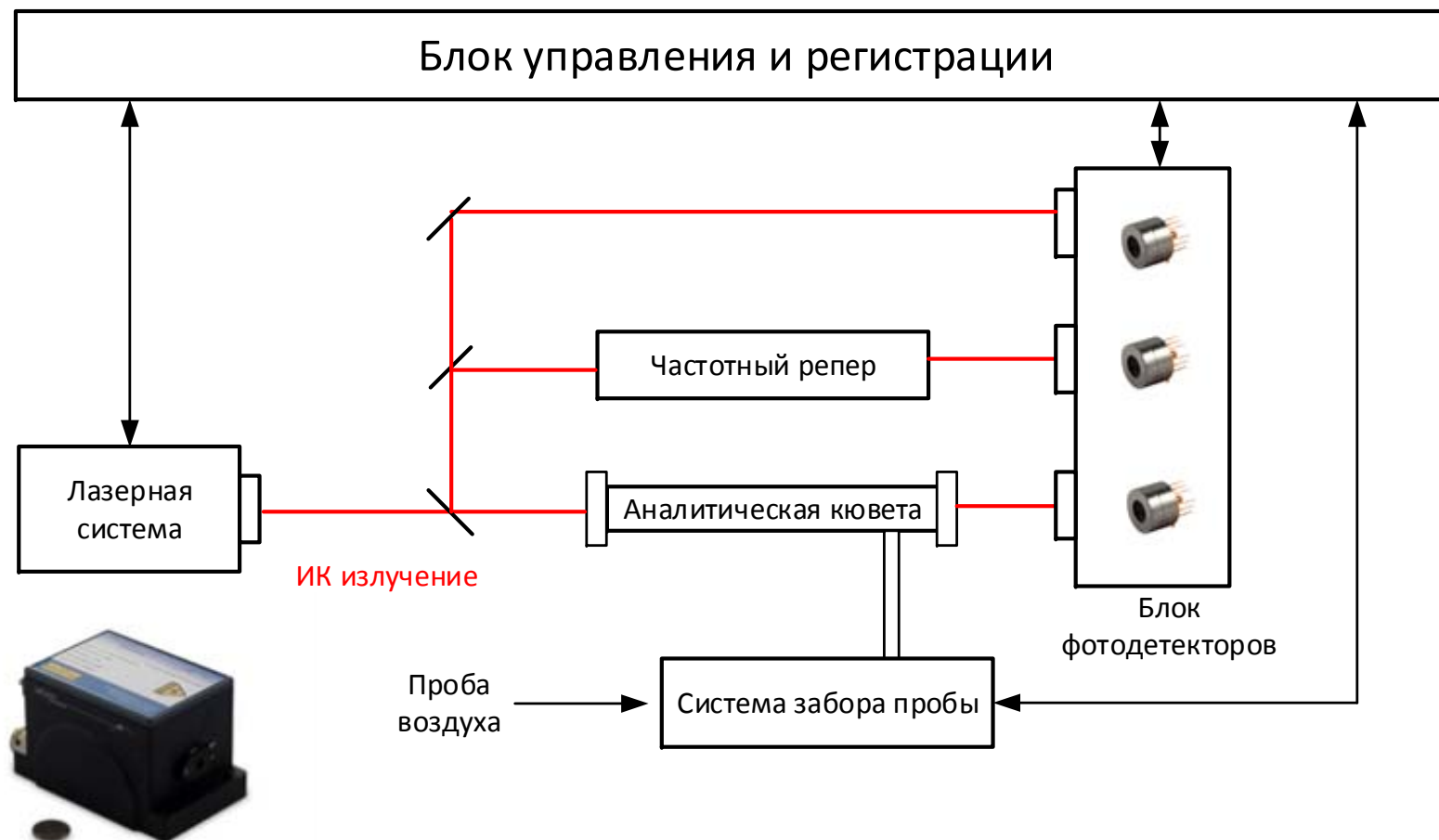
Сравнение результатов эксперимента с данными реанализа  
метеорологических моделей



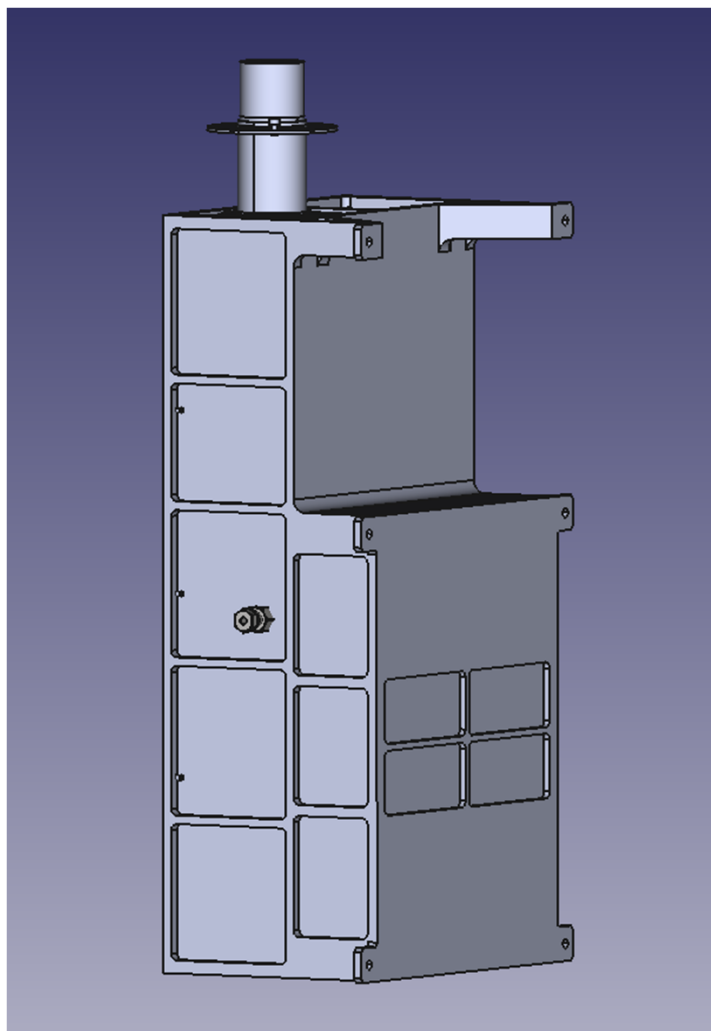
# Анализ внутренней атмосферы МКС



# Анализ внутренней атмосферы МКС

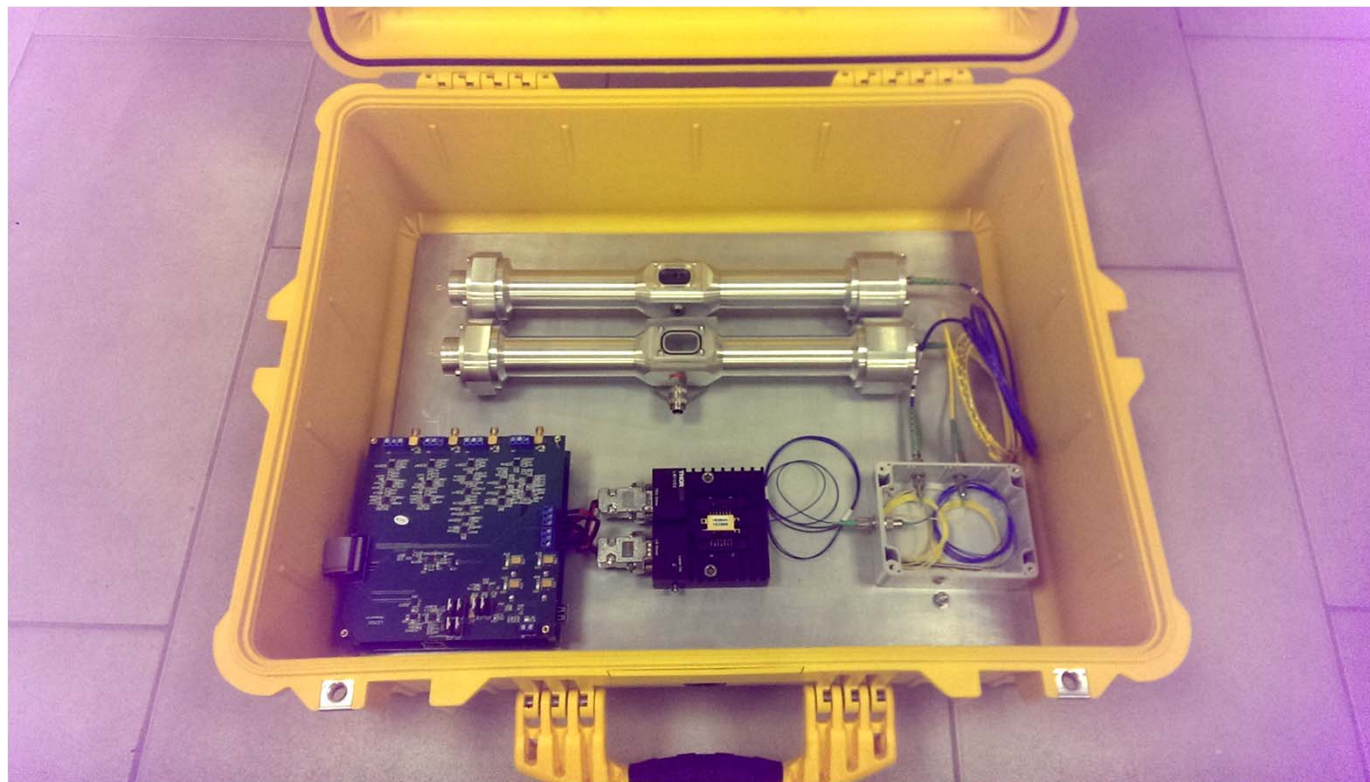


# Экзомарс-2020: лазерный спектрометр М-ДЛС



Кювета ICOS ~ 200 м  
Длительные прецизионные  
измерения  $\text{HDO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}^{17}$ ,  $\text{H}_2\text{O}^{18}$ ,  
 $\text{C}^{13}\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2^{17}$ ,  $\text{CO}_2^{18}$

# Переносной автономный газоанализатор

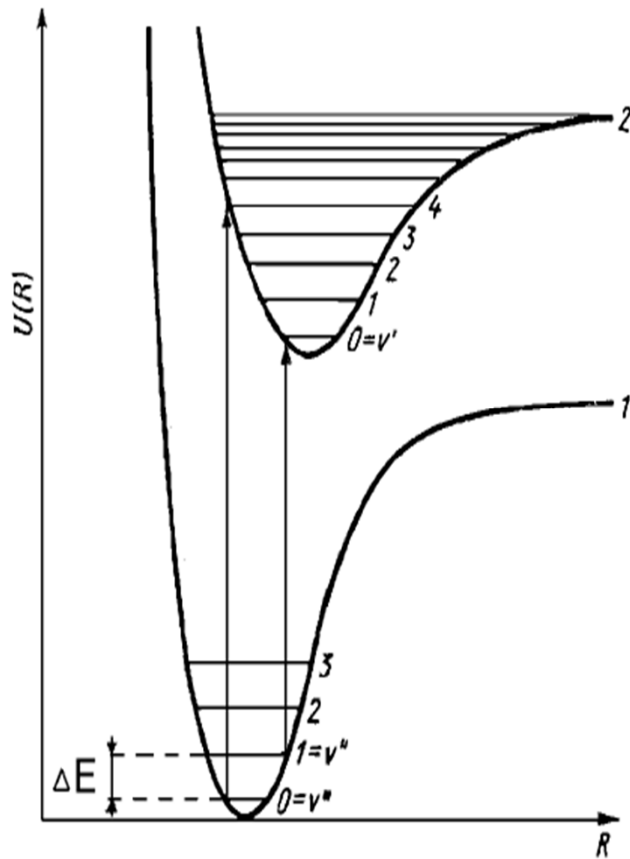


## Конкурентные преимущества:

1. Низкая себестоимость прибора (одноканальный вариант ~ 8 тыс. \$)
2. Низкие эксплуатационные издержки
3. Возможность выбора измеряемых компонент
4. Система push-button

\* *Возможность измерения как в столбе атмосферы так и в точке*

# Измерение температуры методом TDLS: Физические принципы

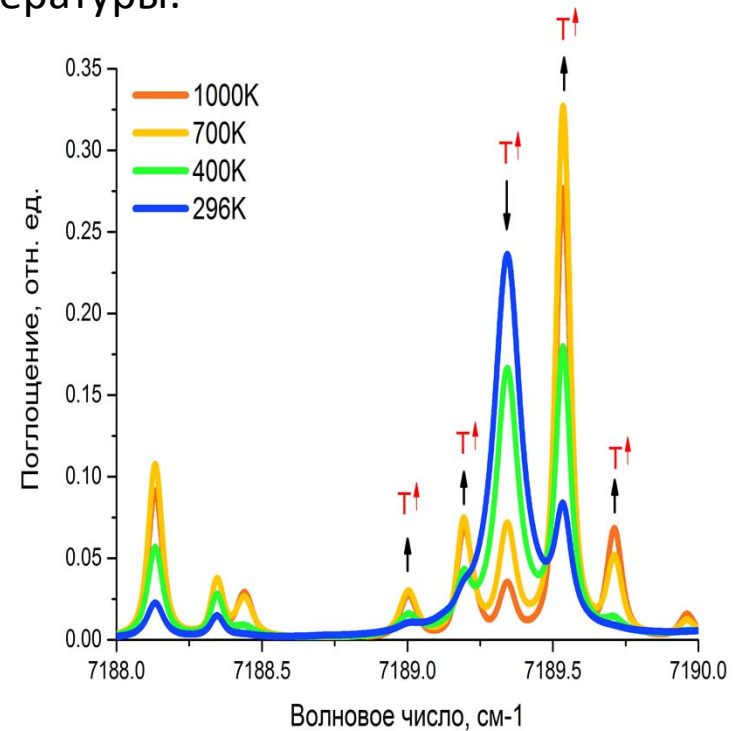


«Горячие» переходы –  
переходы из колебательно  
возбужденных состояний

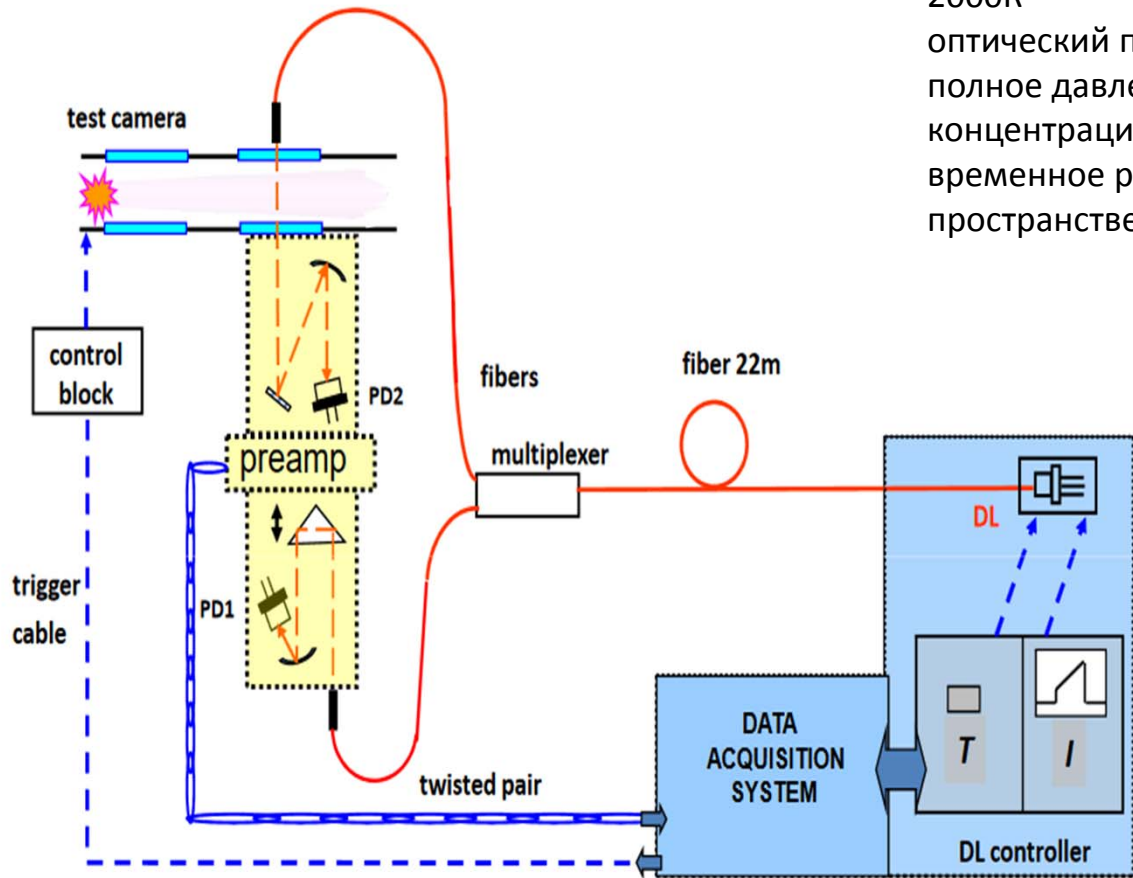
Отношение интенсивностей двух линий  
поглощения:

$$R = \left( \frac{S_1}{S_2} \right)_T = \left( \frac{S_1}{S_2} \right)_{T_0} \exp \left[ - \frac{hc\Delta E}{k} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$$

Изменение спектра H<sub>2</sub>O (1.39 мкм) с ростом  
температуры:



# Измерение температуры методом TDLS: Схема установки ОИВТ РАН



## Параметры эксперимента:

топливо	H <sub>2</sub> , этилен
скорость потока	M~2
температура	300-2000K
оптический путь	70 мм
полное давление	100-300 Torr
концентрация H <sub>2</sub> O	1-10%
временное разрешение	<1 мс
пространственное разрешение	1-2 мм

## Динамика эксперимента:

Запись спектров



Впрыск топлива



Разряд



Поток газа

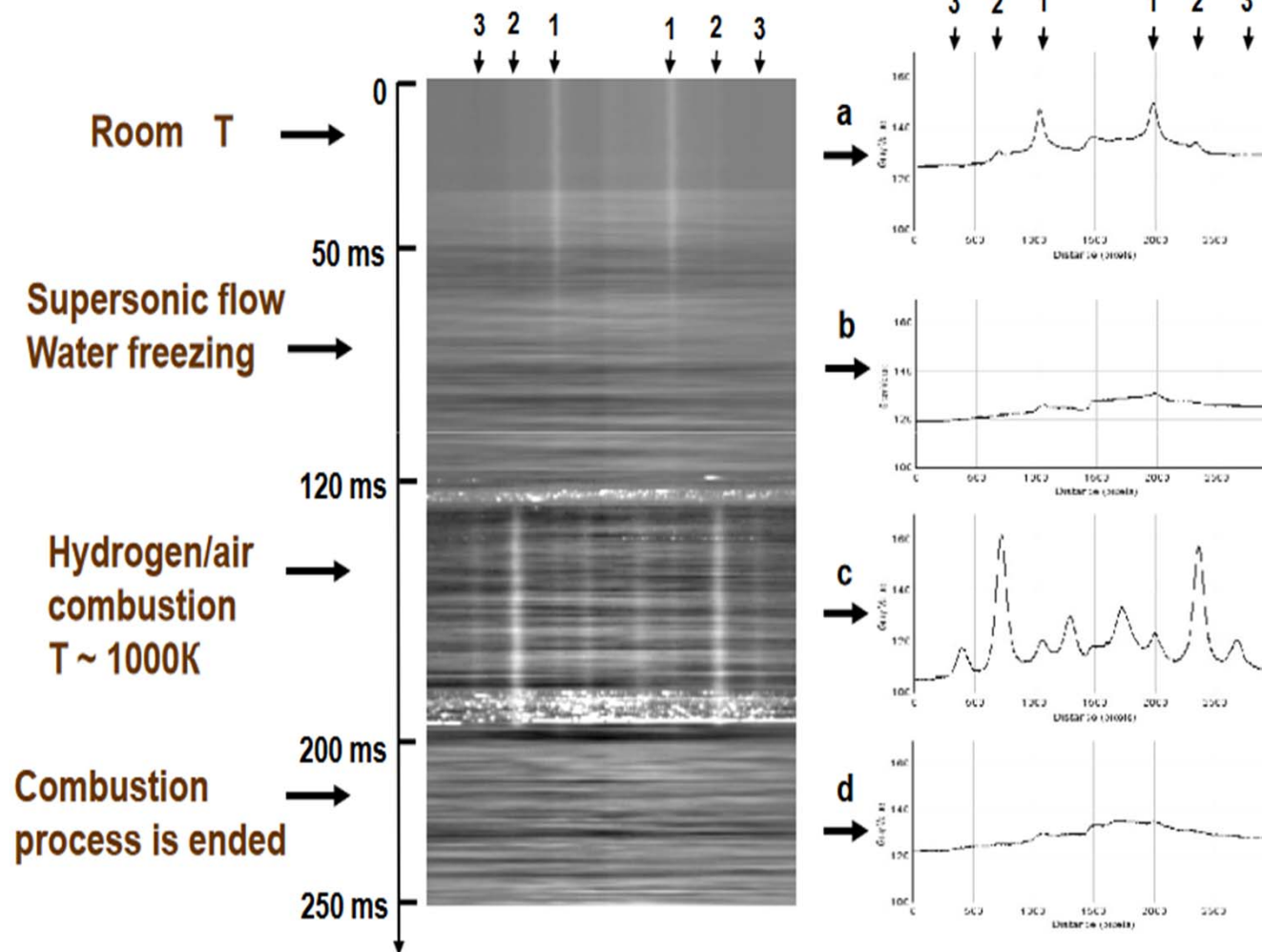


0

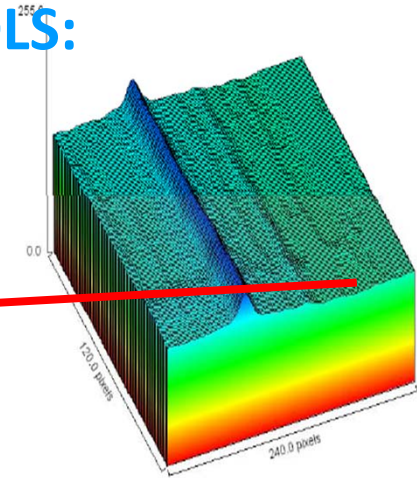
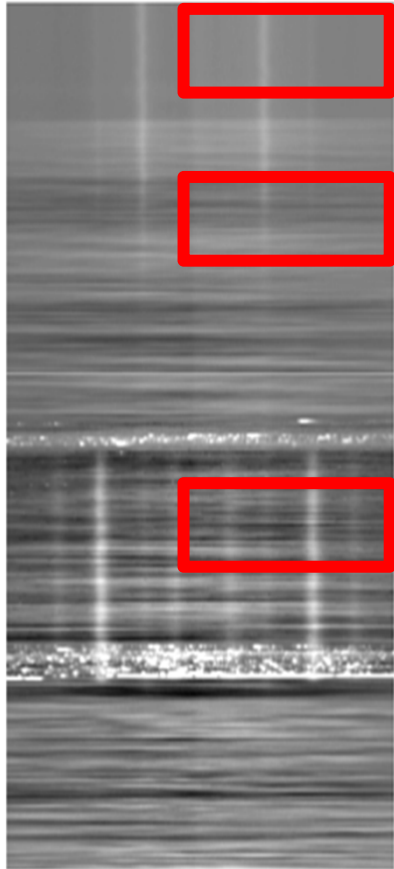
~500 мс  
Время

# Измерение температуры методом TDLS: Динамика процесса горения

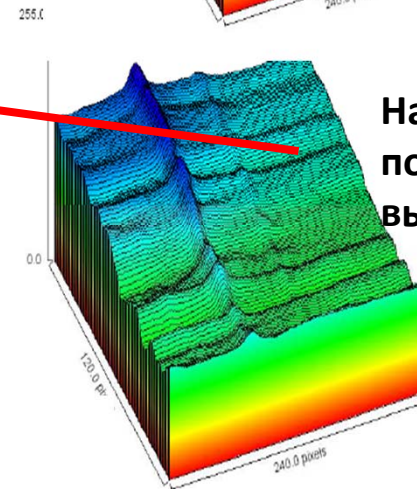
Линии поглощения  $H_2O$



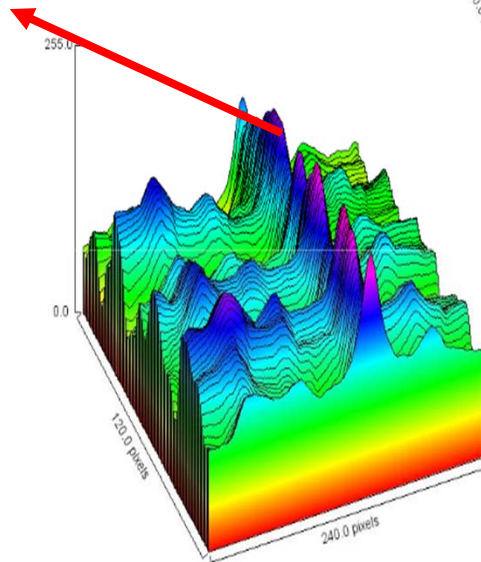
# Измерение температуры методом TDLS: Динамика процесса горения



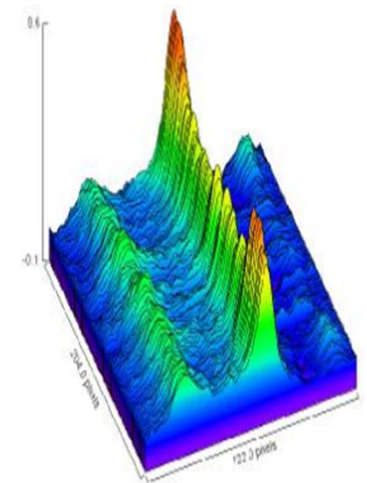
Начальная  
стадия  $T \sim 20^\circ\text{C}$



Начало сверхзвукового  
потока –  
вымораживание  $\text{H}_2\text{O}$



Интенсивное горен  
 $T \sim 1000^\circ\text{C}$



# Заключение

Лазерная спектроскопия (активная и пассивная гетеродинная) может быть использована для:

- Контроля поля скоростей в аэродинамических трубах
- Систем вихревой безопасности
- Контроля состава внутренней атмосферы ЛА
- Предотвращения террористических угроз
- Контроля рабочих процессов в ЖРД, ТРД и ПВРД

