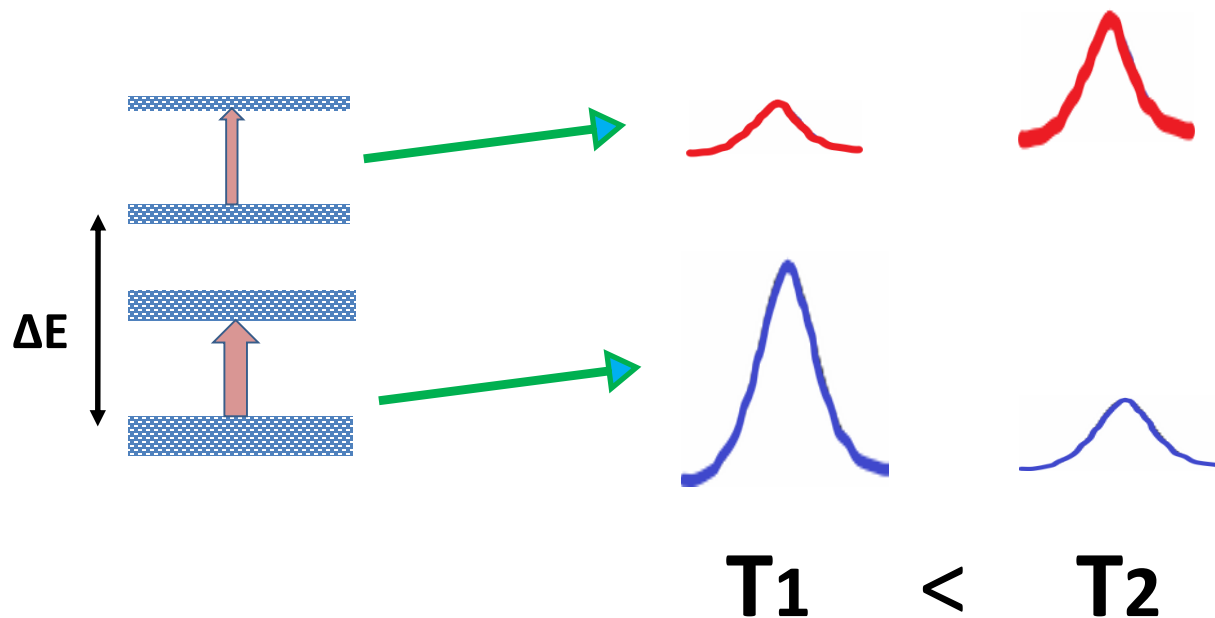


**Определение максимальной температуры
в пространственно неоднородной горячей зоне
методом диодной лазерной
абсорбционной спектроскопии**

М.А. Большов, Ю.А. Курицын, В.В. Лигер, В.Р. Мироненко

Институт спектроскопии РАН, Россия, 142190 Москва, г. Троицк

Принцип лазерной абсорбционной термометрии



Отношение интегральных интенсивностей переходов является функцией температуры :

$$R = \frac{S_1(T)}{S_2(T)} = A \exp(-hc\Delta E / kT)$$

Спектральный интервал 1.3-1.5 мкм

Поглощение $H_2O \sim 10^{-2} \div 10^{-3}$

A - определяется спектроскопическими параметрами переходов

Аппроксимация участком спектра

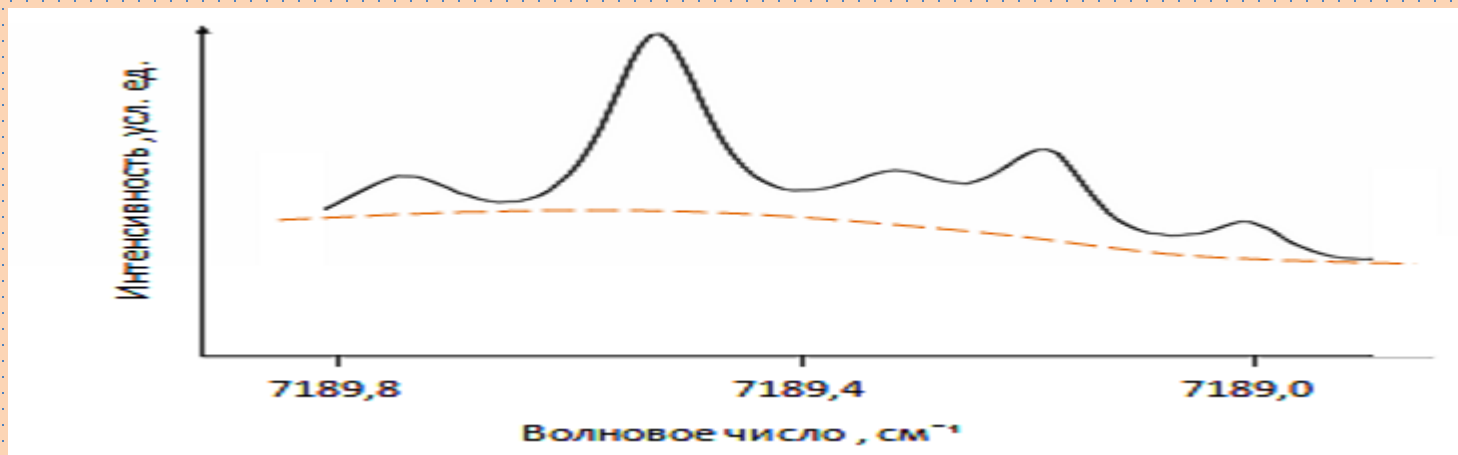
На основе базы данных симулируется участок спектра с выбранными линиями, который подгоняется к экспериментальному спектру.

В качестве подгоночных параметров используются:

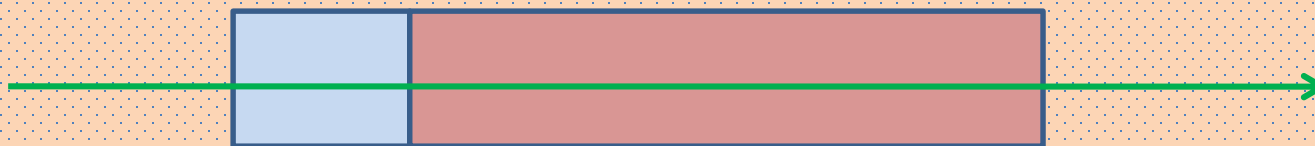
- положения центров линий,
- параметры базовой линии,
- температура,
- полное давление воздуха и
- концентрация молекул воды.

Последние два параметра важны для правильной аппроксимации линий поглощения воды с учетом коэффициентов уширения воздухом и самоуширения.

1. Неопределенность базовой линии

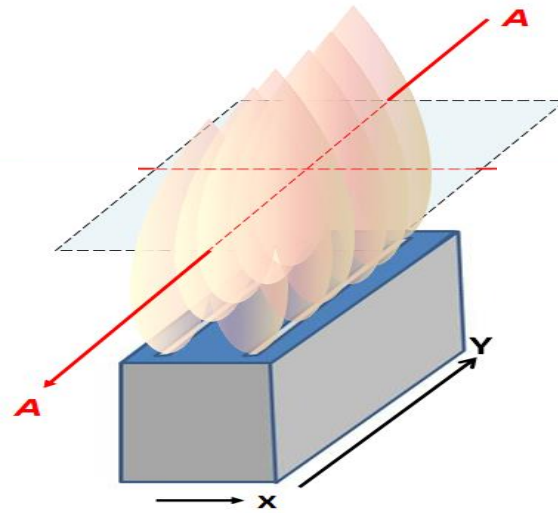


2. Неоднородное распределение температуры



$$T_1 < T_{\text{эфф}} < T_2$$

ГЕОМЕТРИЯ ИЗМЕРЕНИЙ В ГОРЕЛКЕ



A-A вдоль оси *Y* горелки
(вдоль пламени)

ВДОЛЬ ГОРЕЛКИ



Компьютерное моделирование для интервала

7188.8-7189.8 см⁻¹

Модель объекта

T₁=1500K

T₂=500K



Симулированный спектр :

$$S_{\text{сим}} = 0.8 * S(1500) + 0.2 * S(500) + \text{noise}$$

Результат подгонки в предположении
однородного распределения температуры :

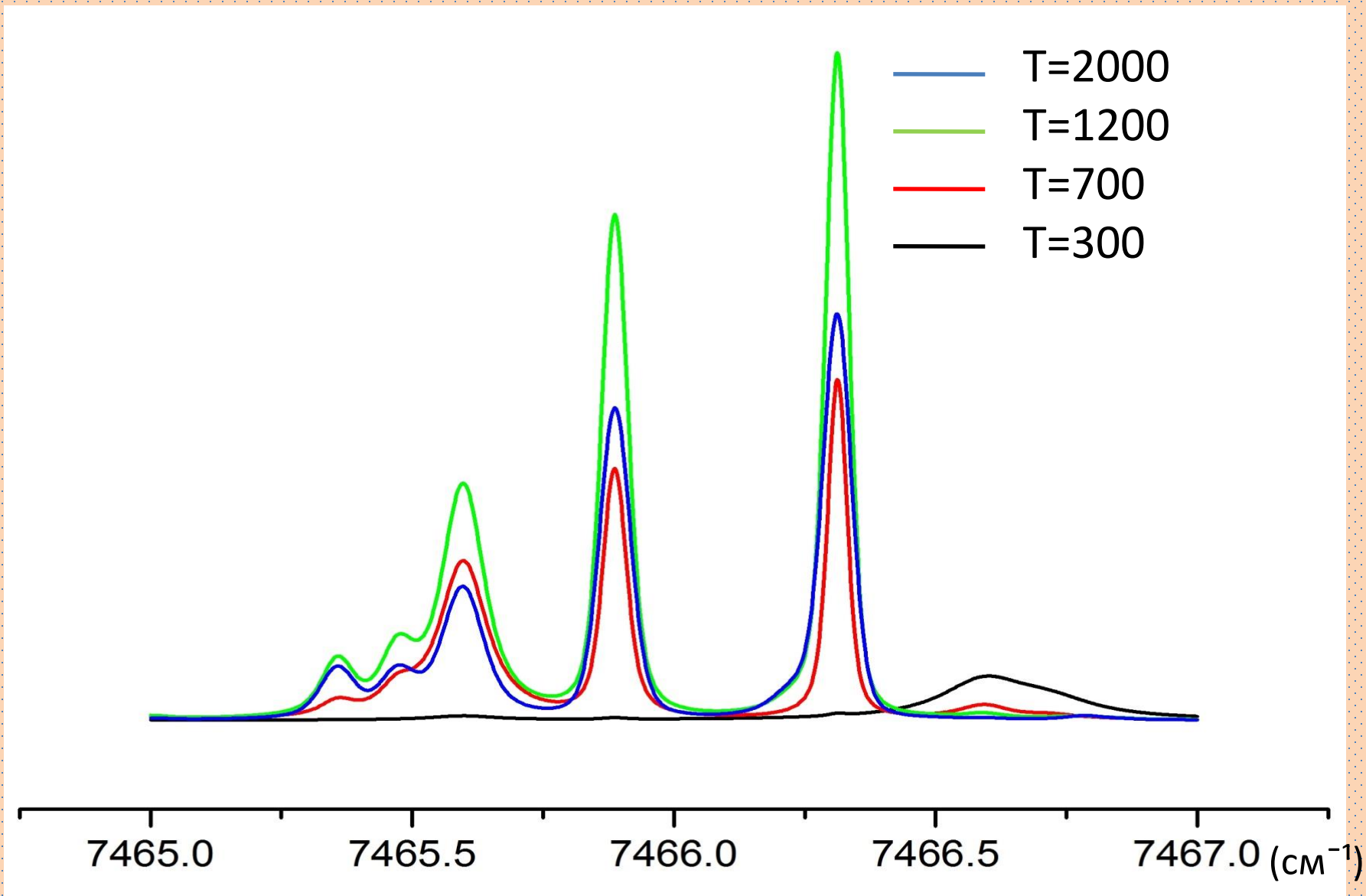
$$T_{\text{эфф}} = 950\text{K}$$

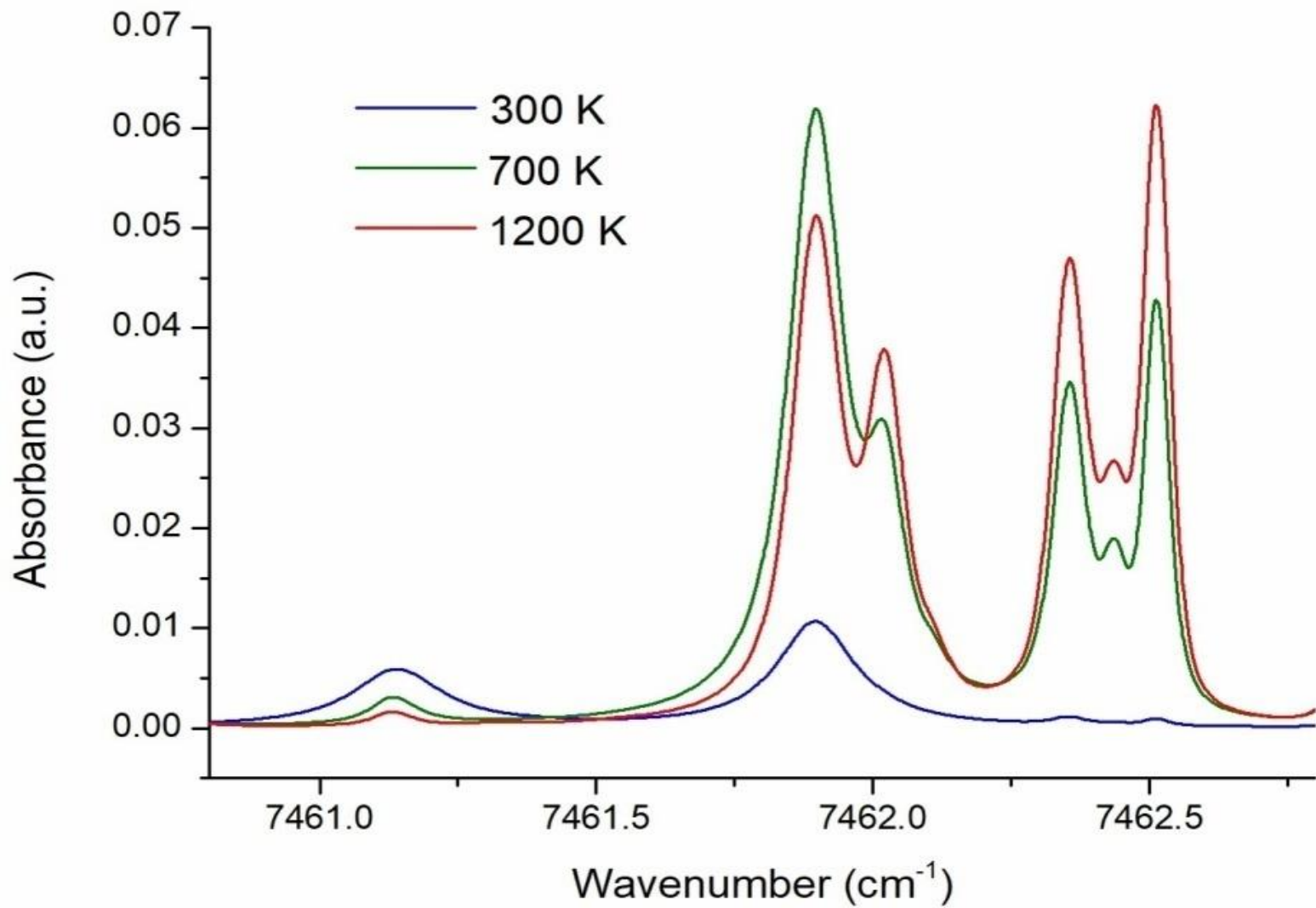
Учет неоднородности распределения температуры объекта

1. Томография
2. Line-of-sight. Много изолированных линий с различной температурной зависимостью.

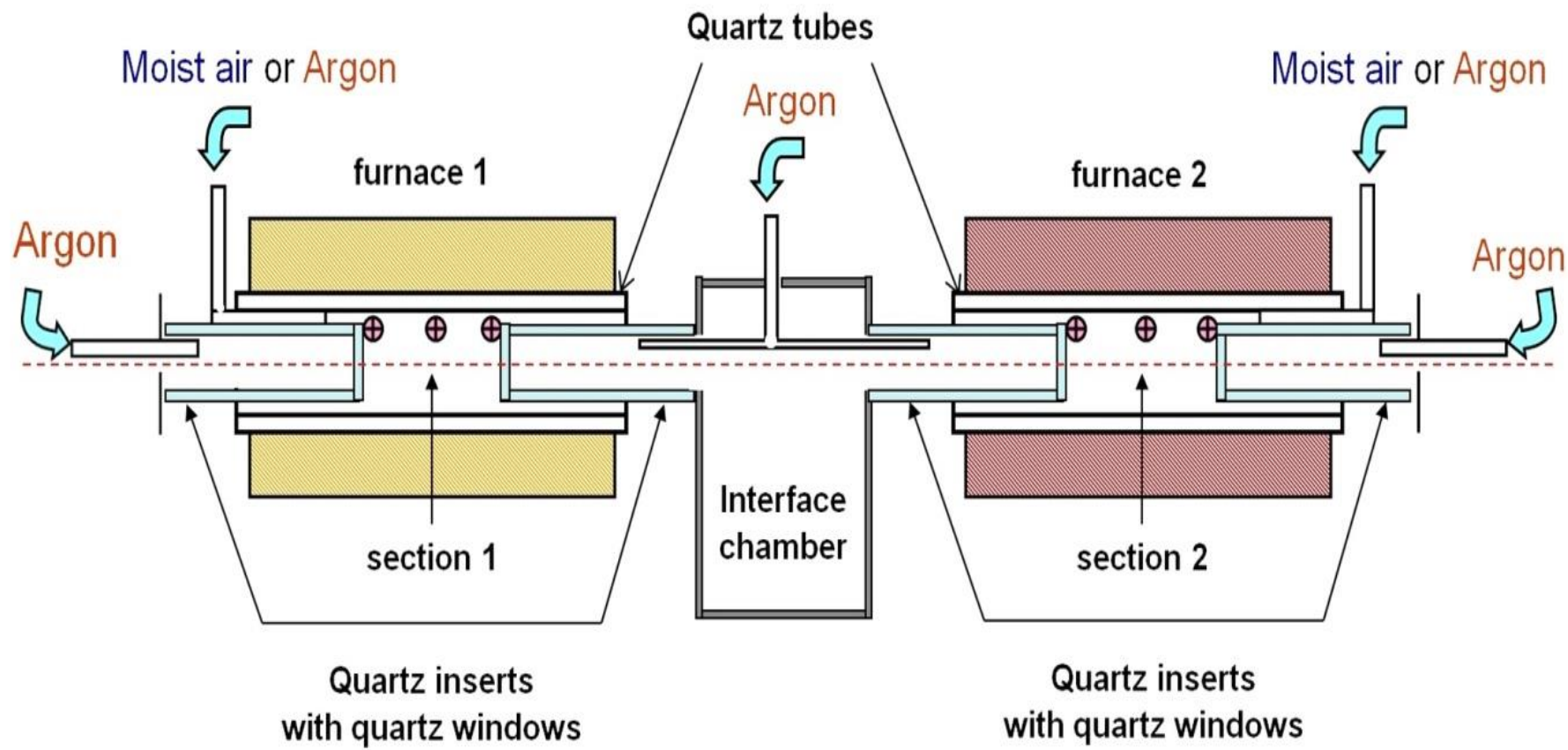
Наш подход

1. Частный, но широко распространенный важный случай – объект имеет протяженную квазиоднородную зону с высокой температурой + переходная область от максимальной до комнатной температуры
2. Принципиально важным является именно знание максимальной температуры.
3. Выбор горячих линий для уменьшения вклада низкотемпературных участков
4. Возможность регистрации этих линий одним, максимум двумя лазерами.
5. Анализ спектров корреляционным методом
6. В случае сильного отличия эффективной температуры от максимальной пытаться использовать двухзонную модель объекта со ступенчатым распределением температур и, таким образом, скорректировать вклад низкотемпературной зоны.



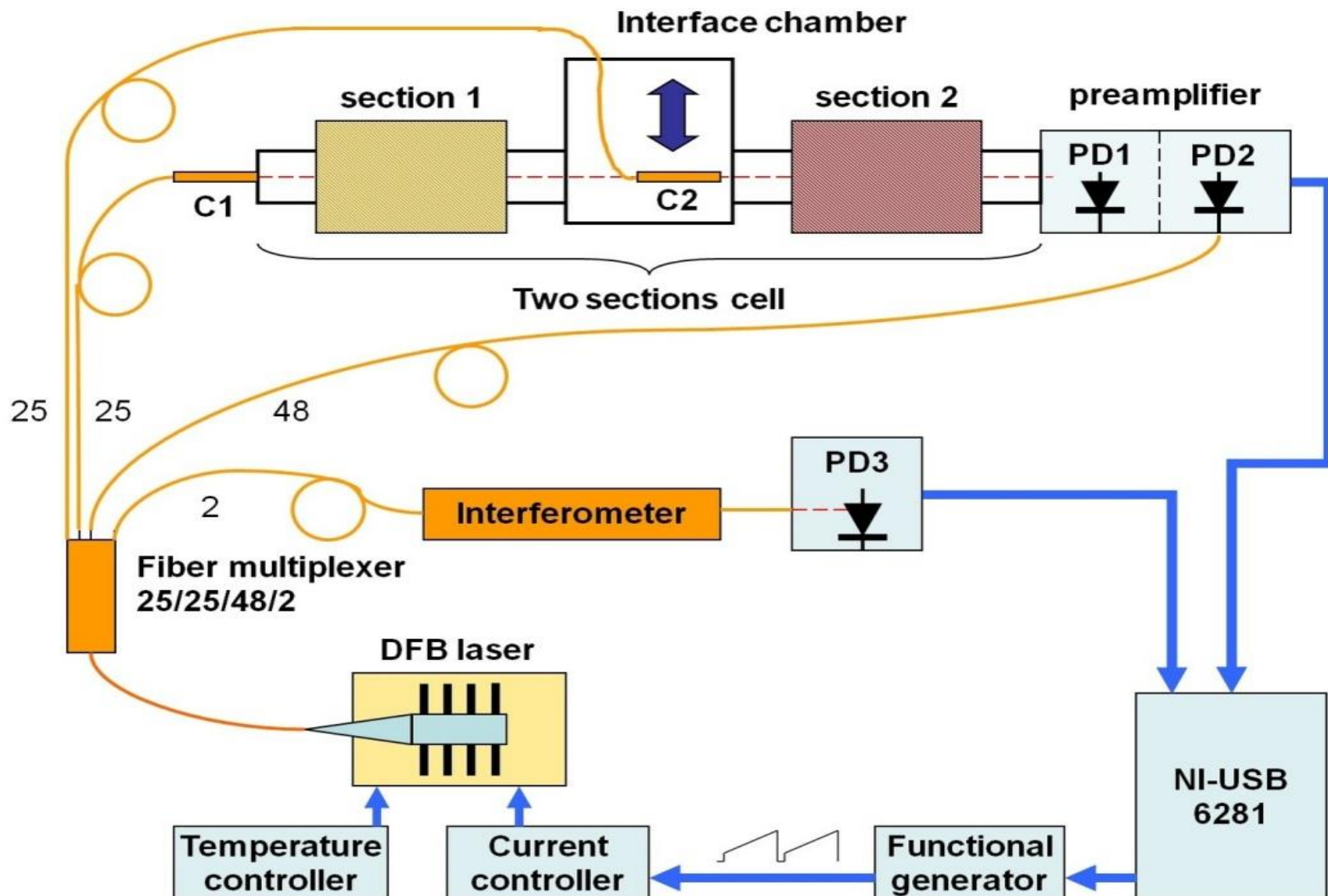


Конструкция двухсекционной кюветы



⊕ - Thermocouples

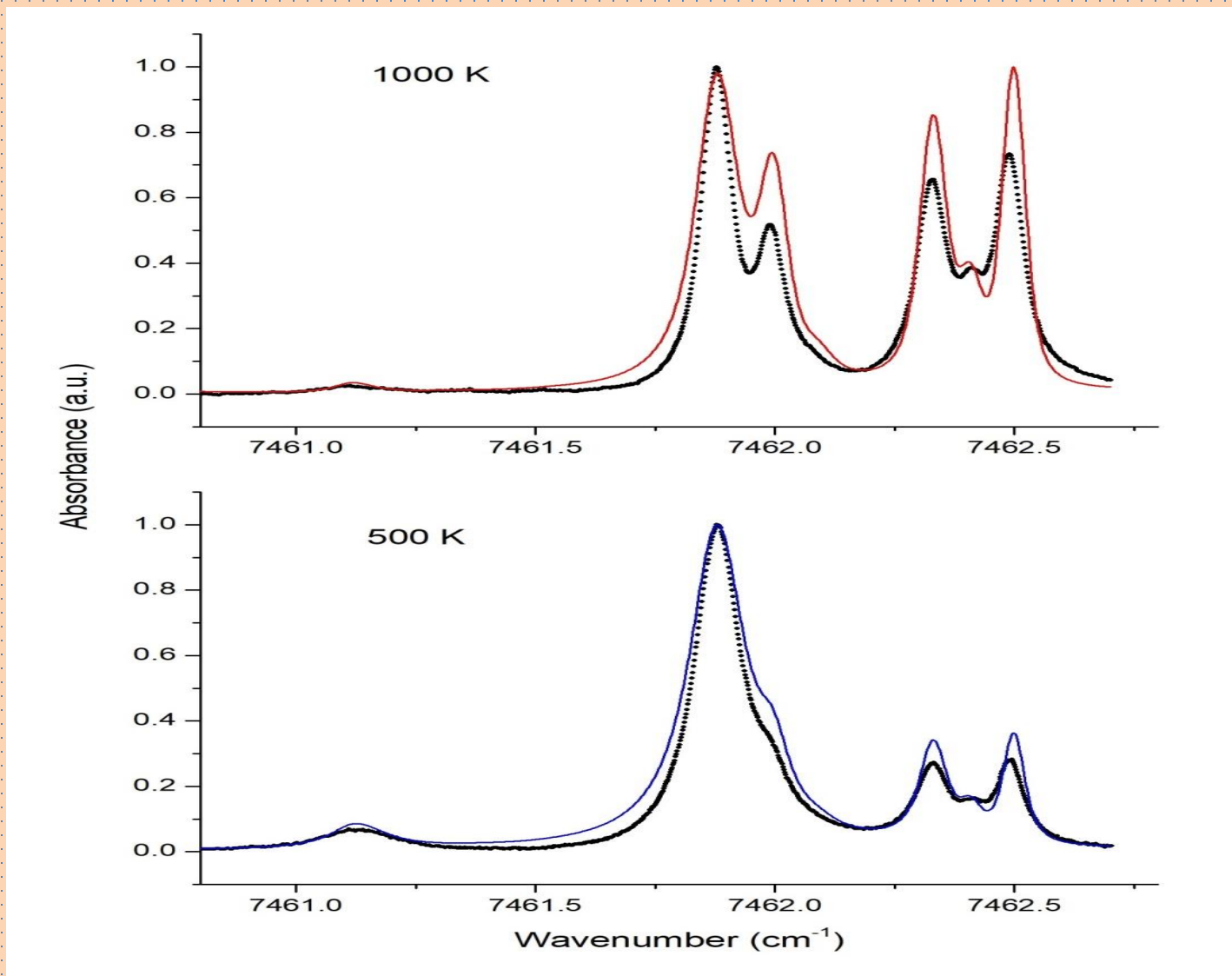
Схема лабораторной установки



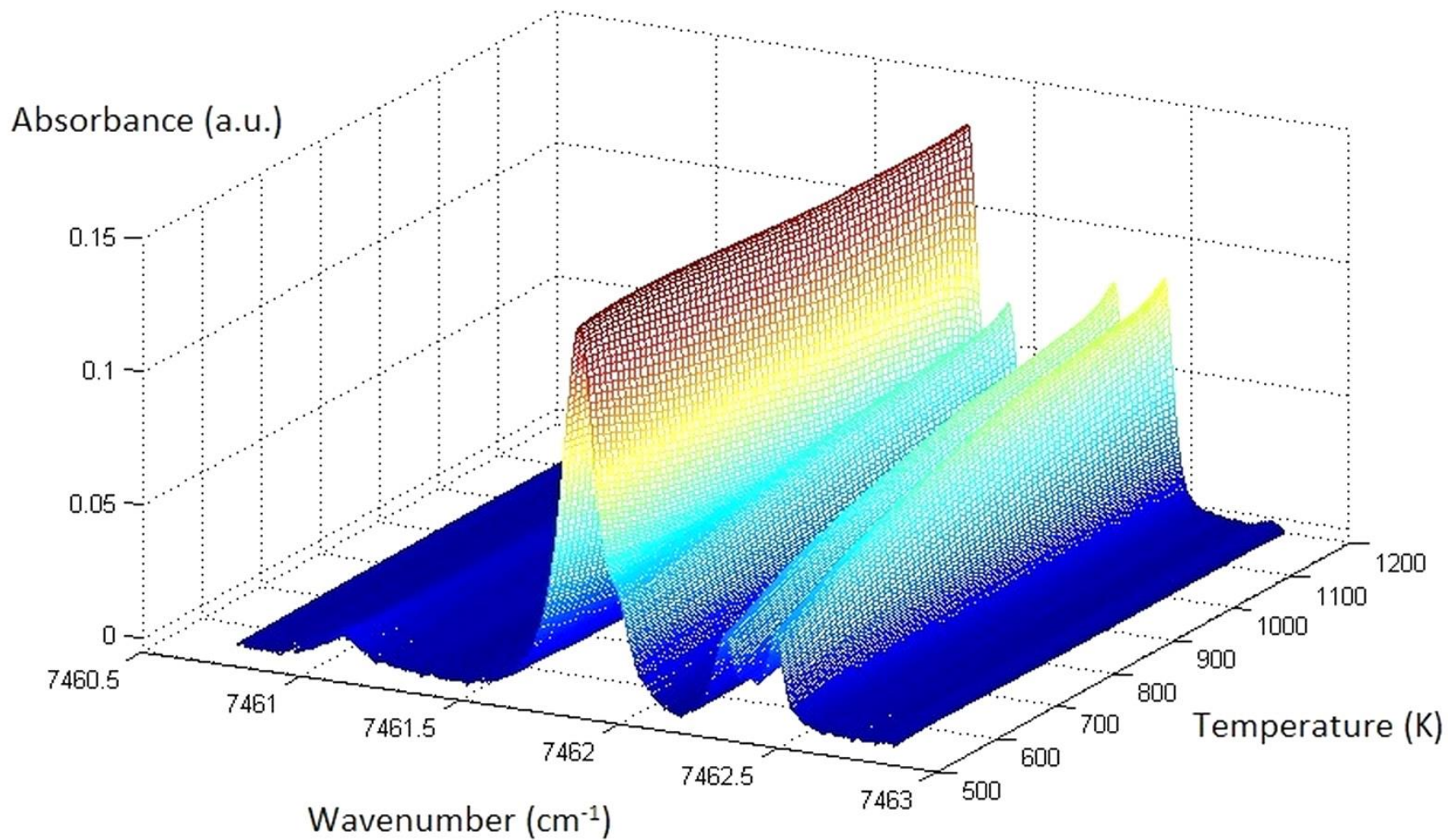
Расхождение экспериментальных и симулированных спектров

Сплошная линия – HITRAN

Точки- эксперимент



Массив экспериментальных спектров в интервале температур 500-1200К (собственная база данных)



Результаты компьютерного моделирования

Экспериментальные спектры симулировались линейной комбинацией двух спектров из базы данных с добавлением шума:

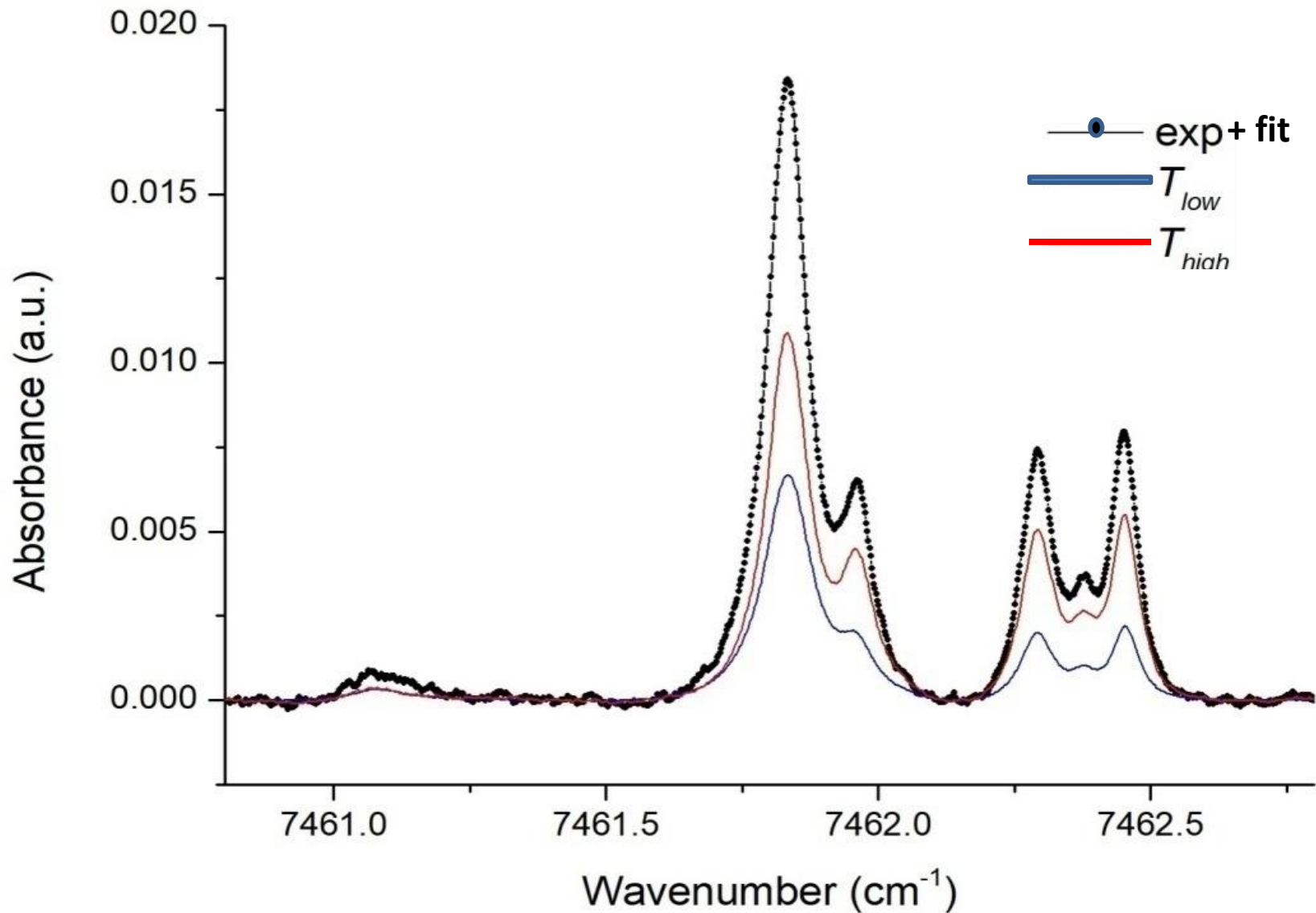
$$S_{\text{сим}} = S(T_1) + S(T_2) + \text{noise}$$

Модель		Расчет			
T2	T1	Teff	T high	T low	K corr
900	500	710	899.9	500.2	0.999859
1200	500	800	1200.7	500.3	0.999842
1500	500	820	1501.1	500.1	0.999794
2000	500	760	1999.8	500.3	0.999548
1200	700	890	1206.3	700.5	0.999896
1500	700	920	1501.8	700.3	0.999842

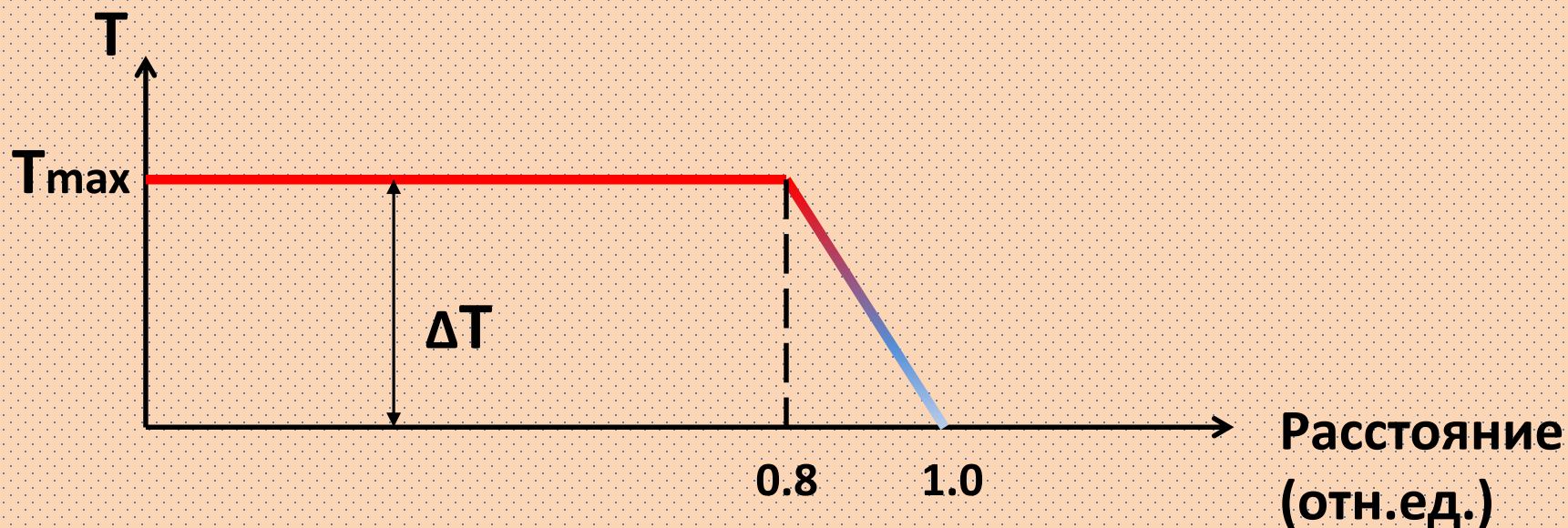
Двухзонный температурный анализ экспериментальных данных

эксперимент		Подгонка одной температурой		Подгонка двумя значениями температуры		
$T_{2(+_2K)}$	$T_{1(+_2K)}$	$T_{эфф}$	$r_{эфф}$	$T_h(+_10K)$	$T_l(+_10K)$	r_{max}
781	576	670	0.9970	780	580	0.9981
888	700	820	0.9866	890	660	0.9906
921	505	780	0.9978	890	600	0.9983
990	580	780	0.9985	990	550	0.9985
1021	690	780	0.9968	1020	550	0.9983
1094	510	890	0.9993	1150	600	0.9997
1152	515	840	0.9961	1160	530	0.9975
1175	520	930	0.9970	1180	580	0.9985

Компоненты подгонки экспериментального спектра ($T_2=921\text{K}$ $T_1=505\text{K}$)

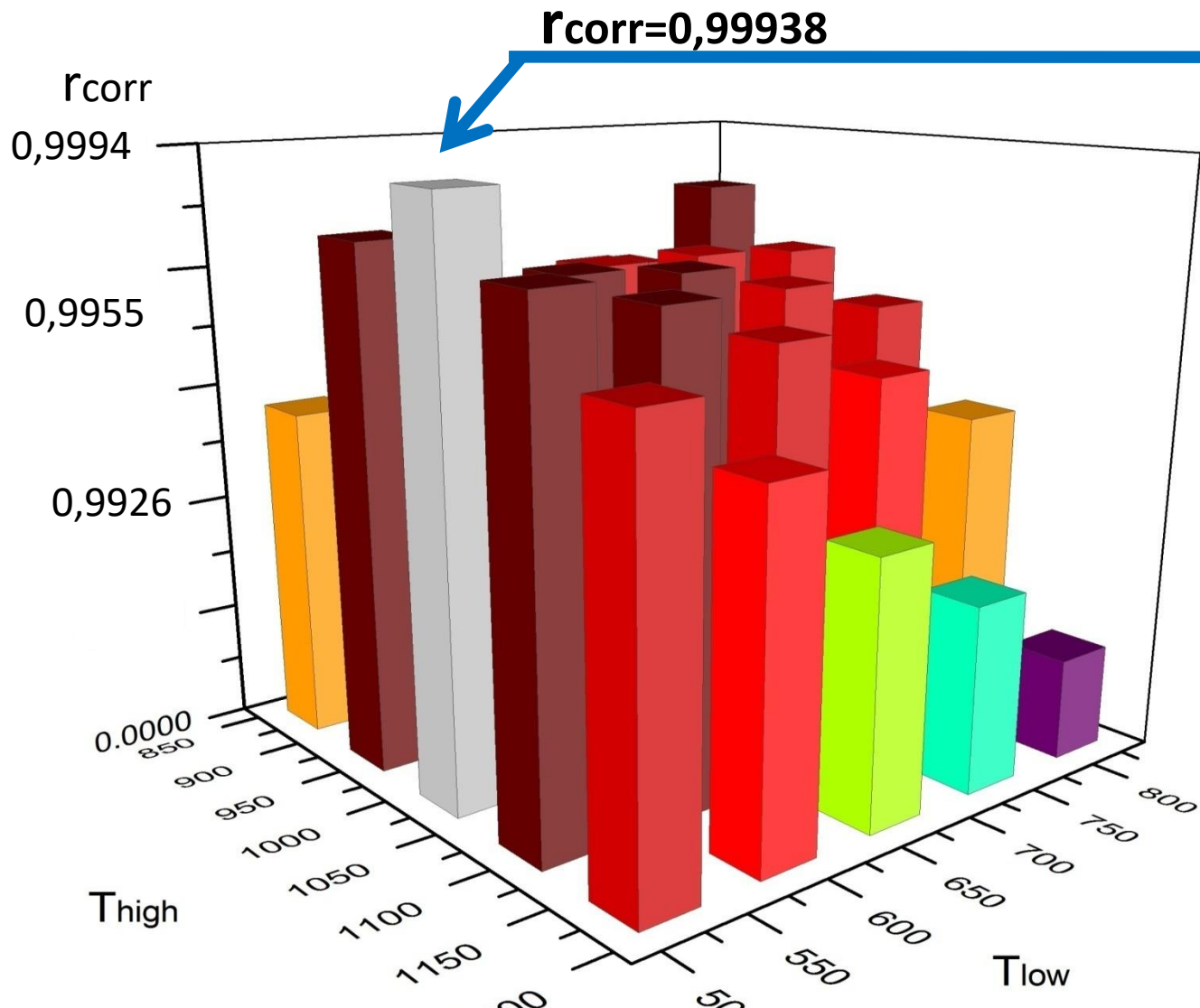


Результаты компьютерного моделирования для трапециевидного распределения температуры

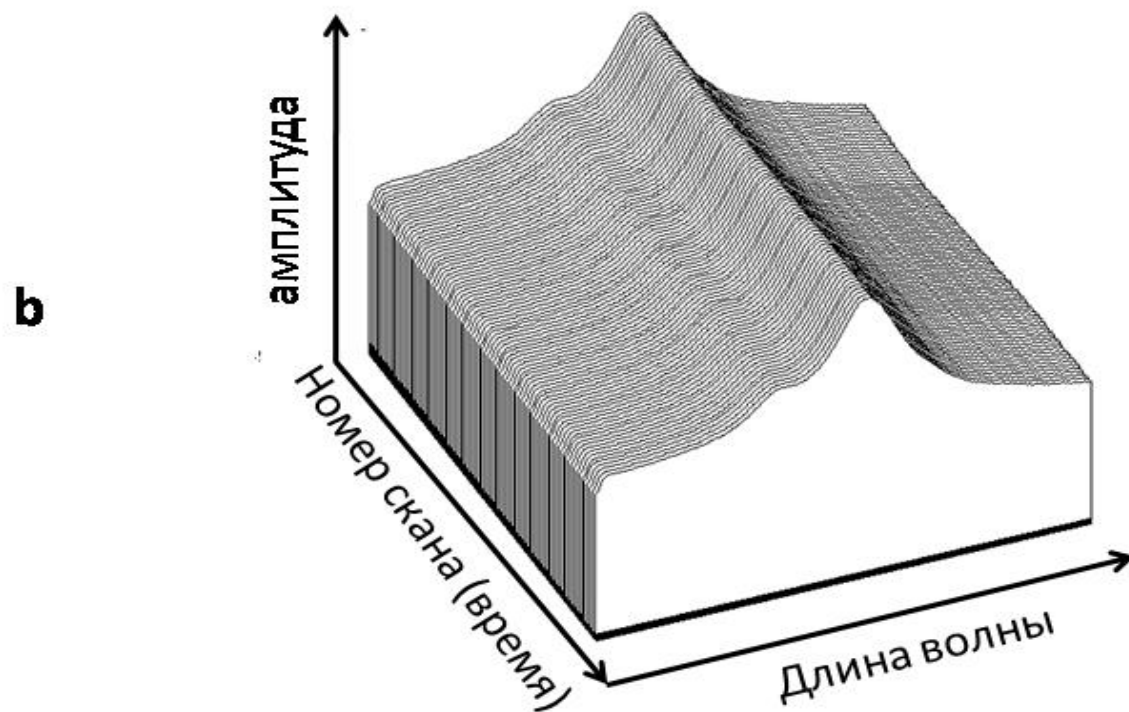
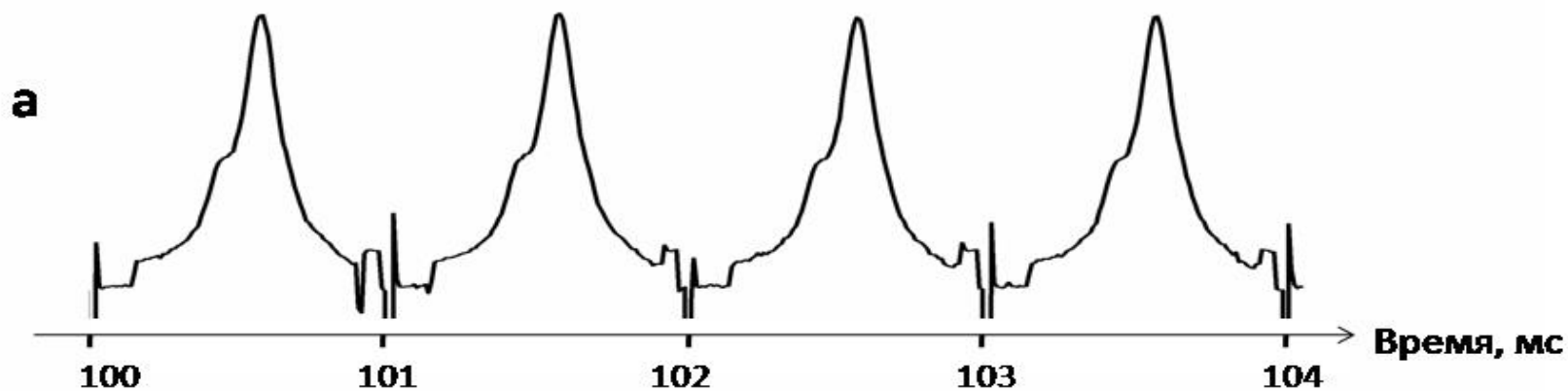


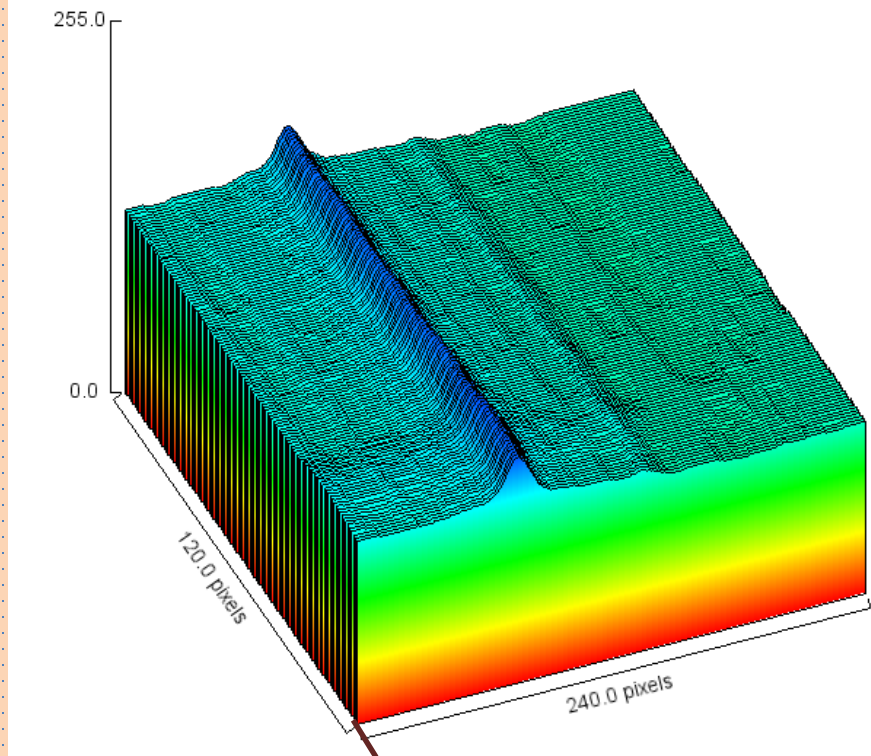
модель		расчет				
T_{\max} (K)	ΔT (K)	$T_{\text{эфф}}$ (K)	r_{\max}	T_h (K)	$T_{l\text{эфф}}$ (K)	$r_{2\max}$
900	300÷900	850	0.99974	886	425	0.99975
1200	300÷1200	1090	0.99971	1163	464	0.99973

$$S_{\text{сум}} = 0.8 * S(1090\text{K}) + 0.2 * S(520\text{K}) + \text{noise}$$



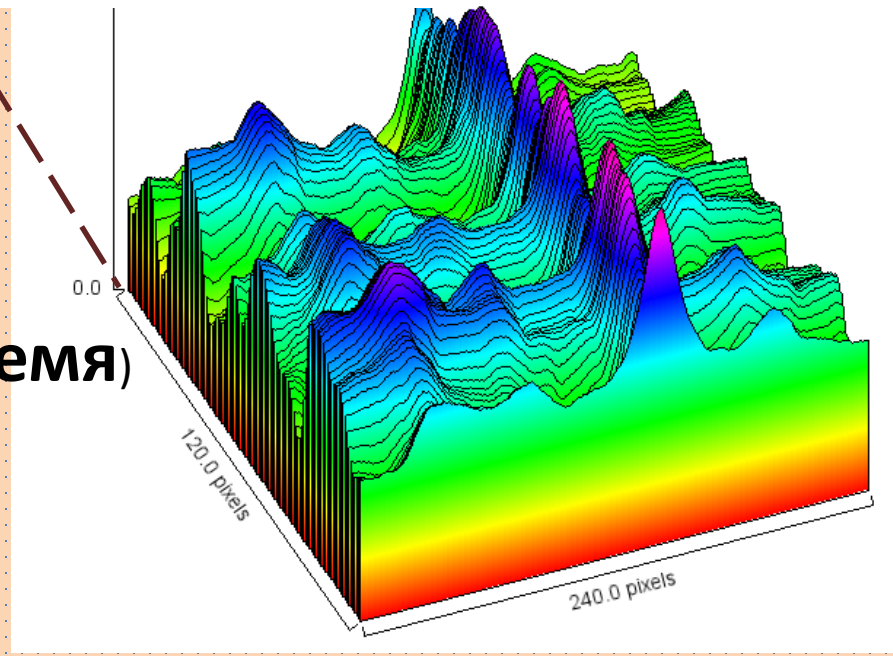
Эволюция спектров в течение эксперимента в 3D представлении





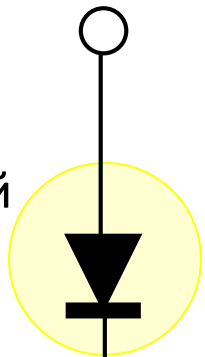
**Фрагменты отдельных
этапов процесса
(ИВТАН)**

**Номер
скана
(время)**

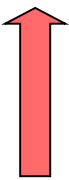


Принцип компенсации влияния вибраций и засветки

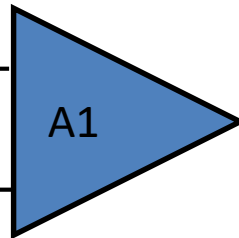
Сигнальный фотодиод



$I_{\text{засветки}}$
 $I_{\text{сиг}}$



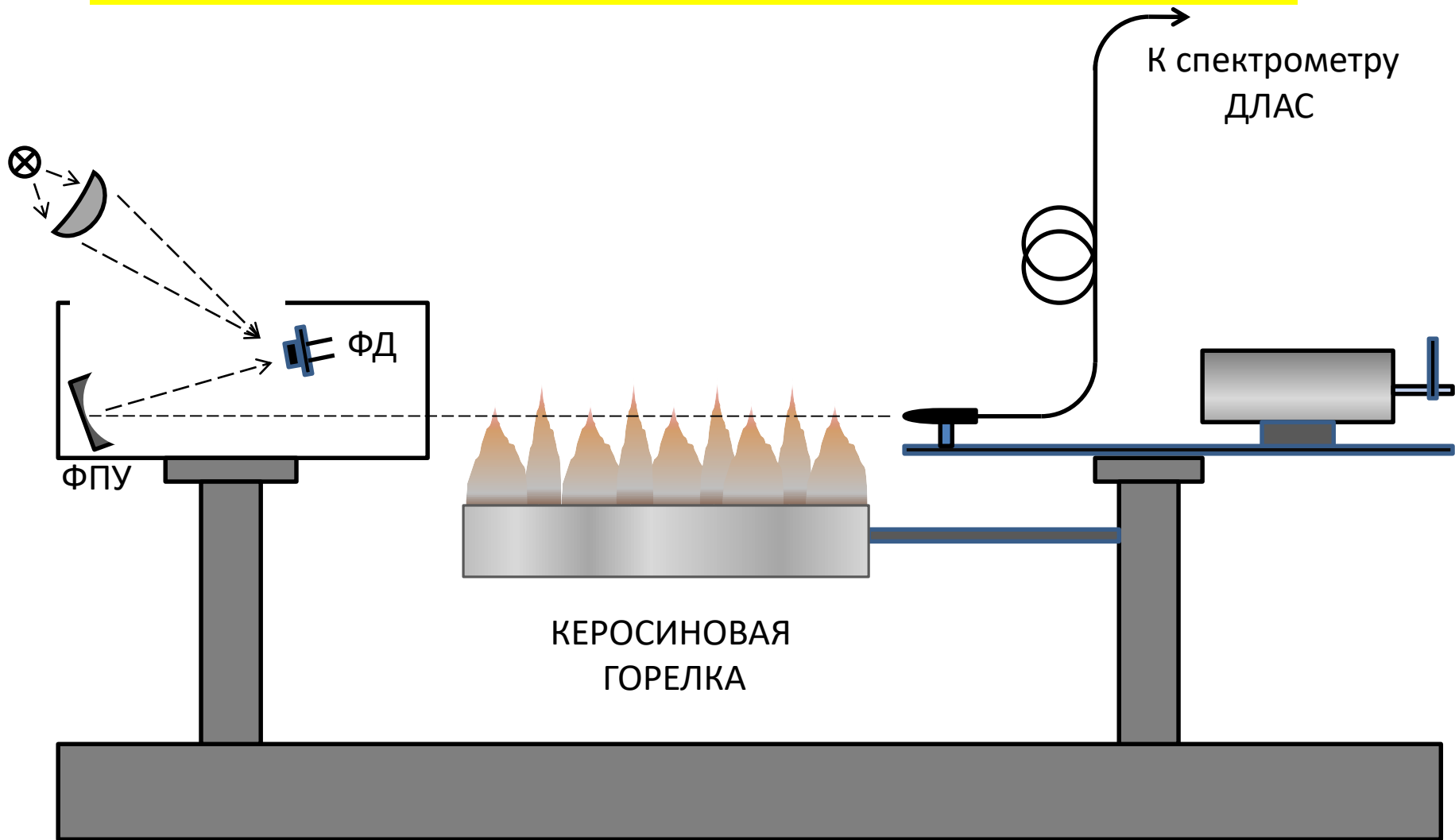
$U_{\text{вых}}$



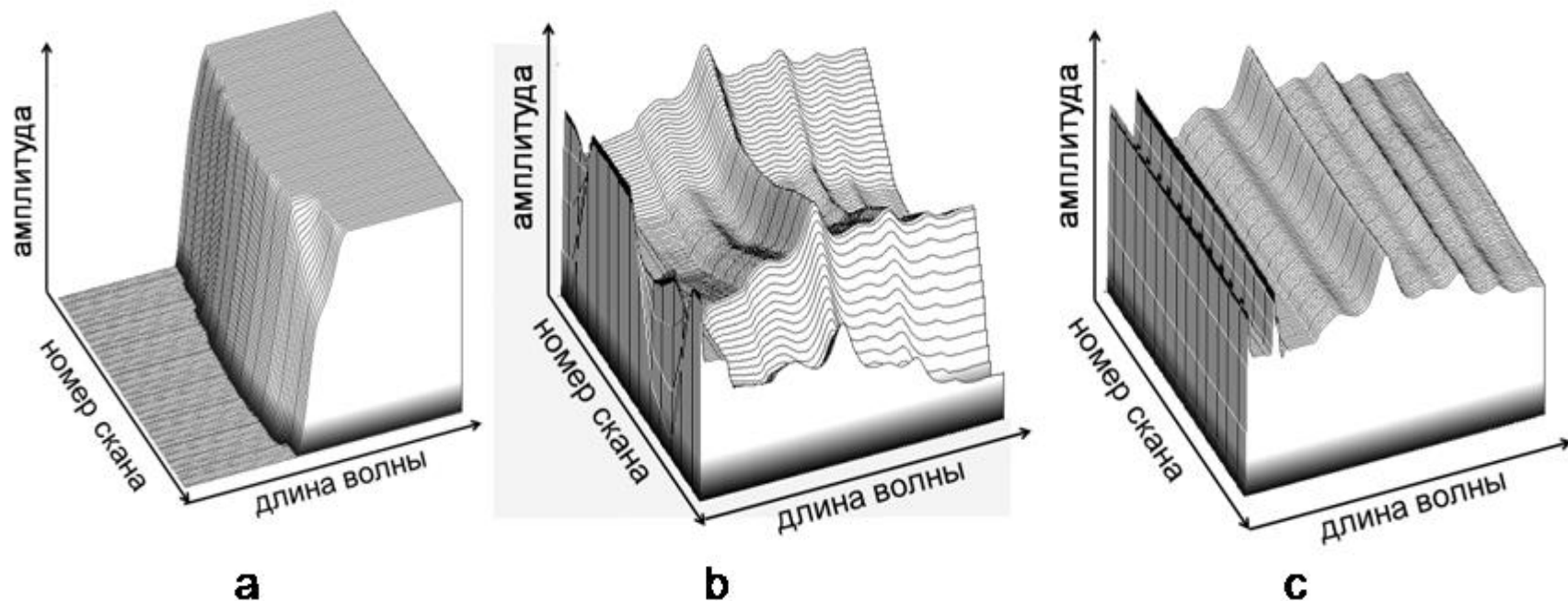
От фотодиода
сравнения

От схемы компенсации
засветки

Установка для моделирования вибраций и пульсирующей широкополосной засветки



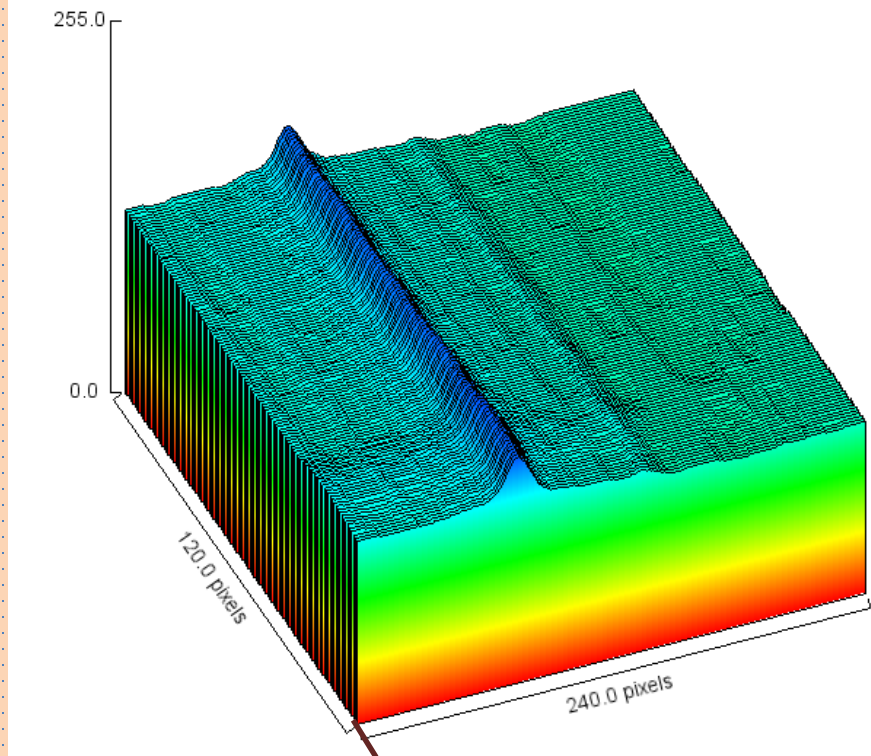
Результат работы схемы компенсации влияния вибраций и засветки (измерения в керосиновой горелке)



a - без компенсации , перегрузка предусилителя

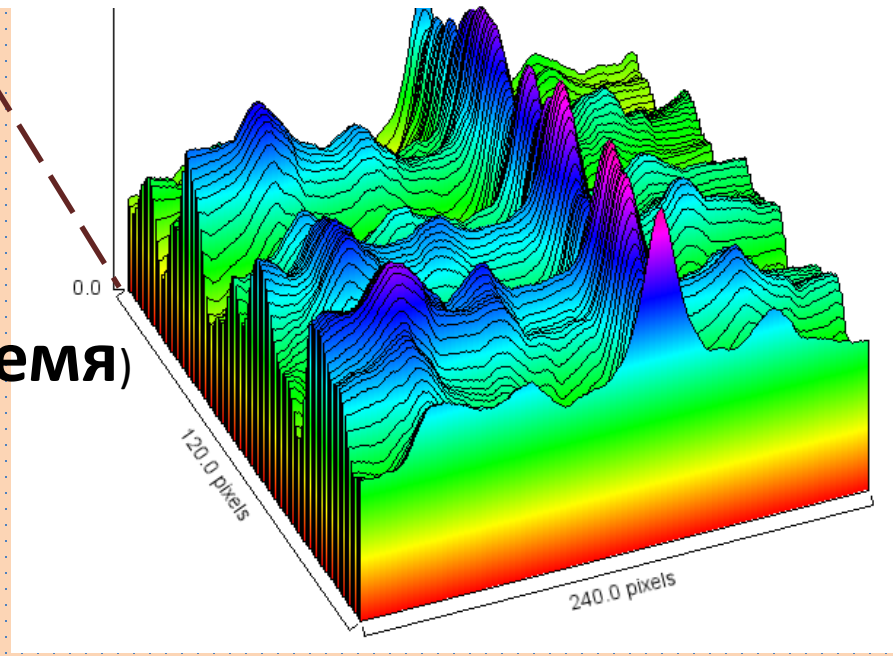
b - включена компенсация засветки. Динамический диапазон восстановлен, но видны сильные флуктуации сигнала из-за вибрации

c - дополнительно включена компенсация вибраций . Все спектры практически стабильны



**Фрагменты отдельных
этапов процесса
(ИВТАН)**

**Номер
скана
(время)**



Выводы

Предложен и экспериментально подтвержден новый алгоритм для оценки максимальной температуры в пространственно неоднородных газообразных объектах.

Особенность этого алгоритма-представление экспериментального спектра поглощения в виде суммы двух однотемпературных спектров "горячей" и "холодной" зон с соответствующими подгоночными коэффициентами.

При практическом применении этого алгоритма для определения температуры продуктов горения в реальных сверхзвуковых установках необходимо использовать конструктивные, аппаратные и программные методы для улучшения отношения сигнал/помеха.

Возможные дальнейшие направления исследований

Подбор оптимального спектрального диапазона с преобладанием “горячих” линий

Разработка критериев применимости двухзонного ступенчатого представления к более реалистичному трапециевидному распределению температур

Модернизация программной обработки спектров с целью обеспечения устойчивости вычислительного процесса.

Возможность применения модуляционной методики с целью дальнейшего улучшения сигнал/шум.

Спасибо за внимание