

**Применение ДЛС для измерения  
изотопного состава, следовых  
количеств и изучения процессов  
гидролиза  $UF_6$  в условиях реальной  
атмосферы.**

*А.И.Надеждинский, Я.Я.Понуровский, Д.Б.Ставровский*  
*Отдел ДЛС*

*Центр естественно-научных исследований Института общей физики  
им. А.М.Прохорова РАН*

*С.Л.Малюгин, Ш.Ш.Набиев, Г.Ю.Григорьев*  
*Н.М.Горшунов*

*Институт молекулярной физики РНЦ “Курчатовский Институт”*

# Введение

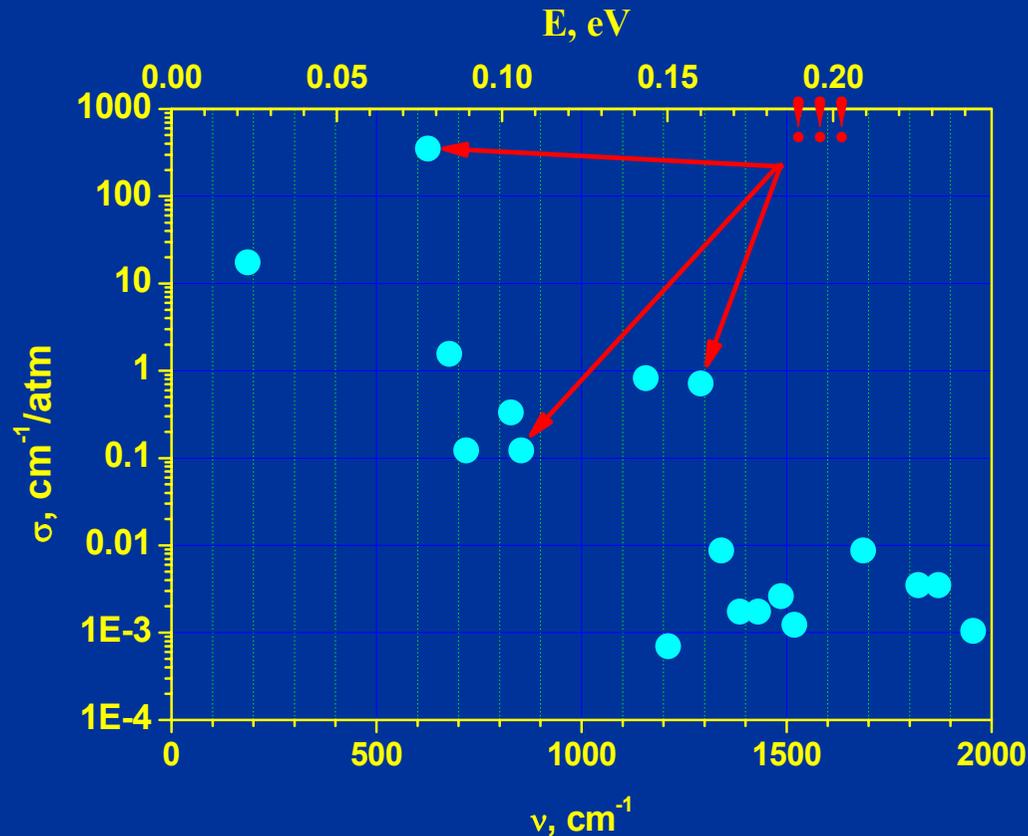
Методы спектроскопии с применением перестраиваемых диодных лазеров (ПДЛС) были впервые использованы в ряде стран в исследованиях молекулы  $UF_6$  в ходе экспериментов по лазерному обогащению изотопов урана. Радикальное совершенствование методов ПДЛС в последние десятилетия и успехи в обнаружении следов молекул с неразрешенными спектрами привлекло внимание ученых к исследованию  $UF_6$  в плане требований МАГАТЭ по безопасности.

Цели работы:

1. Исследование возможности использования методов ПДЛС для измерения степени обогащения гексафторида урана.
2. Исследование возможности обнаружения следовых количеств  $UF_6$  в атмосфере.
3. Измерение следовых количеств HF обусловленных гидролизом гексафторида в атмосфере.

# Сечения полос поглощения $UF_6$ в среднем ИК

не

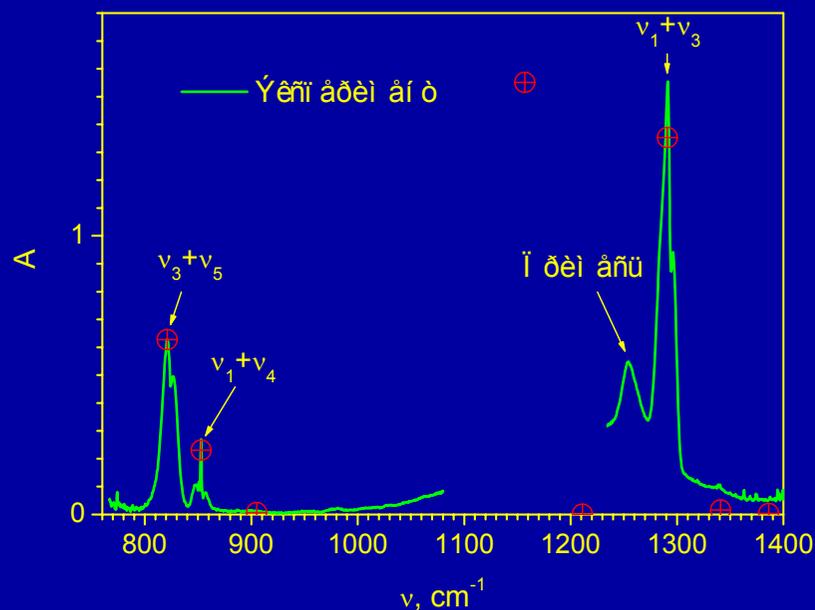


Сечения поглощения молекулы  $UF_6$  в среднем ИК диапазоне [1].

Стрелками показаны полосы поглощения гексафторида урана, наиболее оптимальные для измерения степени обогащения и обнаружения следовых количеств.

Полоса поглощения	$\nu, cm^{-1}$	$\sigma, cm^2/atm$	
$\nu_1 + \nu_3$	1291	0.72	Измерение ст. обогащения
$\nu_1 + \nu_4$	853	0.12	Измерение ст. обогащения
$\nu_1$	625	350	Измерение сл. количеств

# Идентификация полос поглощения



Полоса	$\nu$ , $\text{cm}^{-1}$	$\sigma$ , $\text{cm}^{-1}/\text{atm}$
$2\nu_3 + \nu_6$	$1386 \pm 2$	0.0018
$\nu_1 + \nu_2 + \nu_6$	1341	0.0088
$\nu_1 + \nu_3$	$1290.9 \pm 0.5$	0.72
$2\nu_2 + \nu_6$	$1211 \pm 2$	0.0007
$\nu_2 + \nu_3$	$1156.9 \pm 0.5$	0.82
$\nu_3 + 2\nu_6$	$905 \pm 2$	0.0035
$\nu_1 + \nu_4$	$852.8 \pm 0.5$	0.12
$\nu_3 + \nu_5$	821	0.33
$\nu_3$	625	350

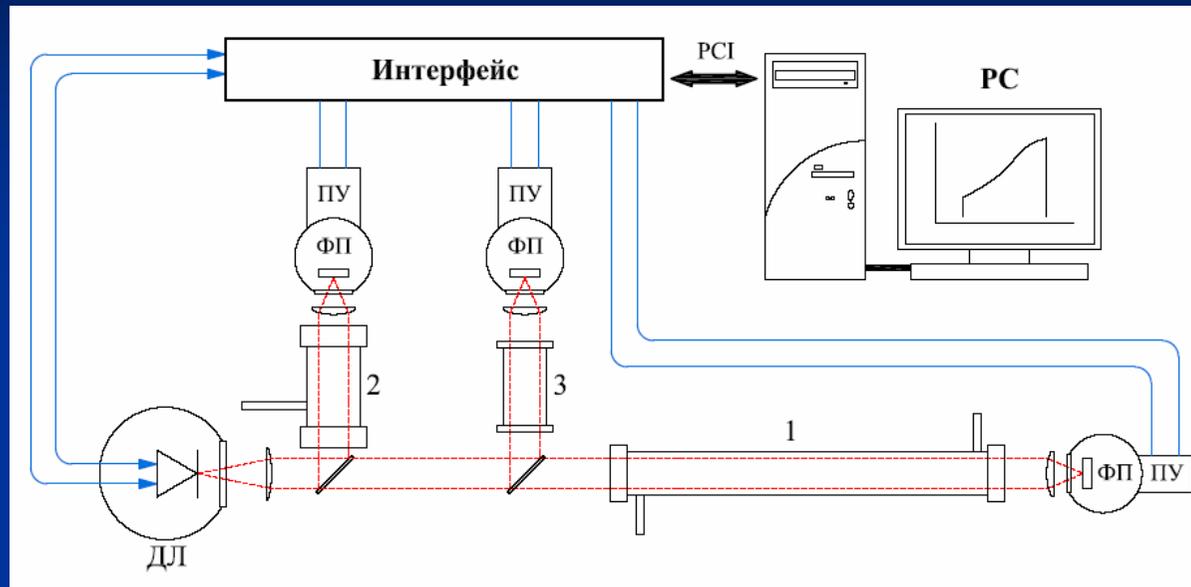
Спектры поглощения гексафторида урана.

Изотоп сдвиг некоторых нормальных колебаний  $\text{UF}_6$ .

Изотоп сдвиг, $\text{cm}^{-1}$	$^{235}\text{UF}_6 - ^{238}\text{UF}_6$
$\nu_1$	0
$\nu_3$	$0.65 \pm 0.09$
$\nu_4$	$0.16 \pm 0.09$

*Комбинационная полоса  $\nu_1 + \nu_3$  выбрана для измерения степени обогащения. Две другие полосы могут быть рассмотрены как альтернативные для изотопных и следовых измерений  $\text{UF}_6$ .*

# Блок схема газоанализатора изотопического отношения $UF_6$



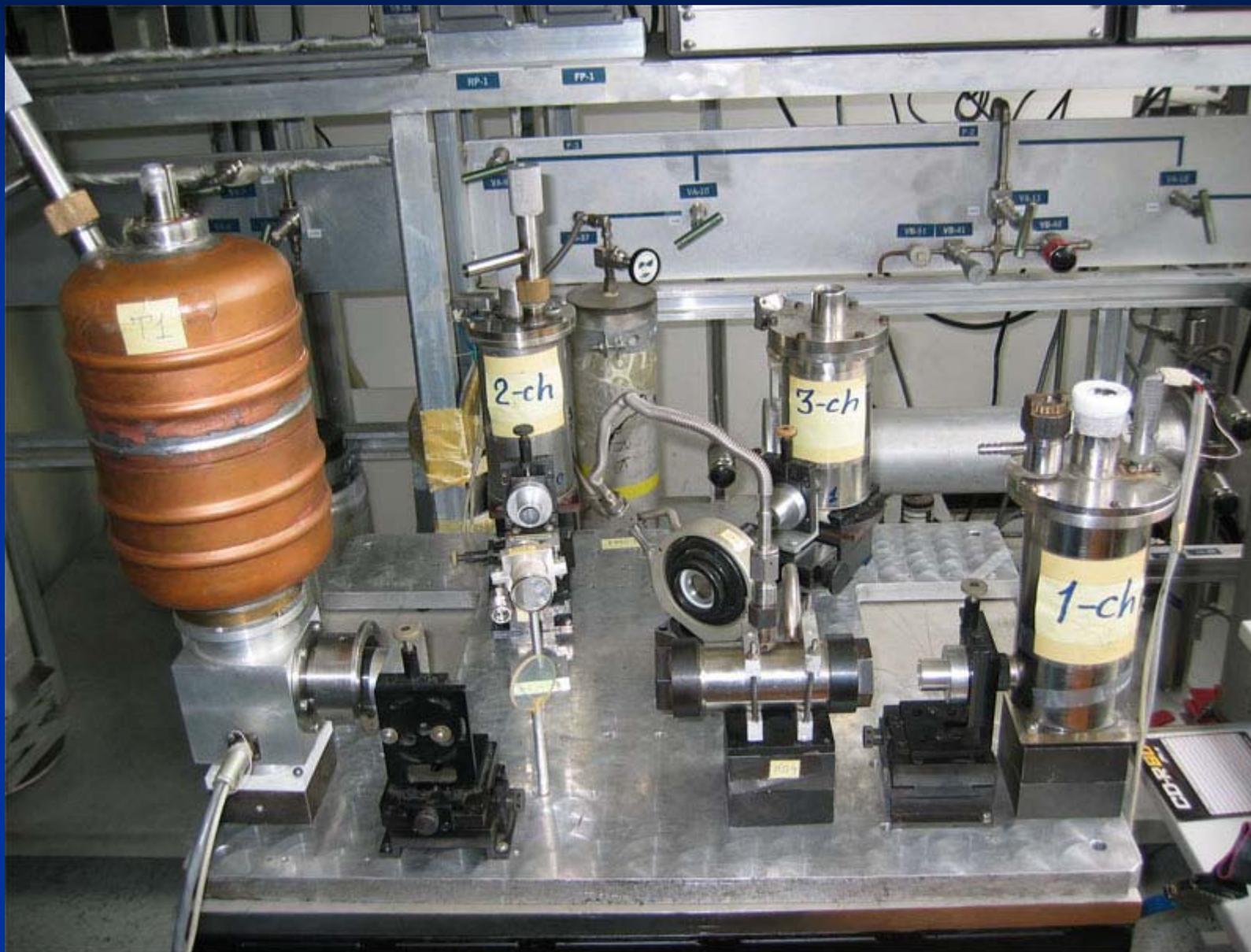
ДЛ – диодный лазер;  
ФП – фото приемник;  
ПУ – предусилитель;  
РС – компьютер.

Кювета (1) аналитического канала с исследуемым газом ( $UF_6$ ).

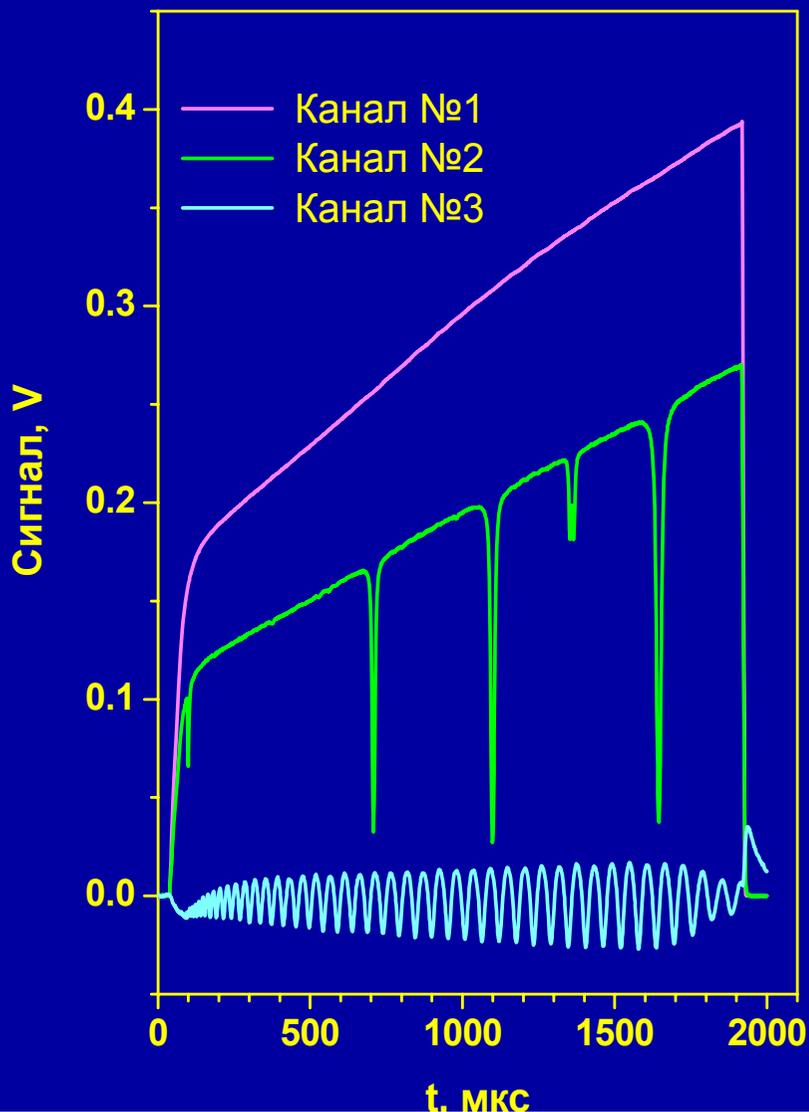
Канал сравнения (2) - для стабилизации частоты излучения по линии поглощения реперного газа ( $CH_4$ ,  $C_2H_2$ ) и абсолютной привязки частотной шкалы.

Канал частотной калибровки (3) - линейаризация частотной шкалы по интерферометру Фабри-Перо.

# Внешний вид прибора



# Режим работы газоанализатора



Накачка ДЛ производилась импульсами тока трапециевидной формы. Длительность импульса 1-3 мс, частота повторения – 250 Гц.

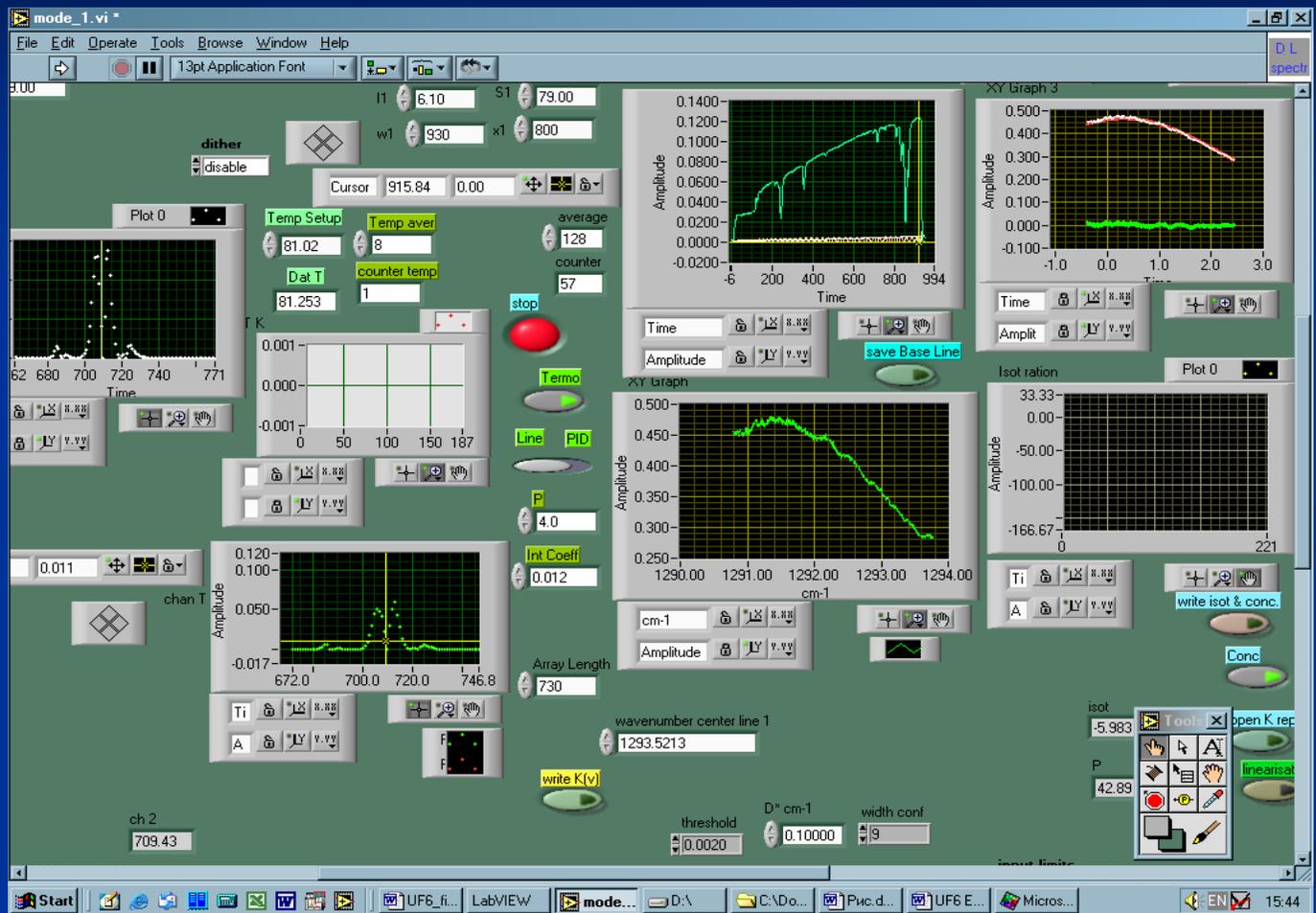
Перестройка частоты осуществляется за счет разогрева кристалла ДЛ во время прохождения импульса тока накачки.

Сигналы с фотодетекторов трех независимых каналов записывались одновременно. Каналы № 2 (сигналы поглощения реперного газа метана) и № 3 (сигналы пропускания интерферометра Фабри –Перо) предназначены для проведения абсолютной калибровки частотной шкалы спектров поглощения гексафторида урана и стабилизации частоты излучения по линии поглощения реперного газа.

После проведения линейаризации и частотной привязки погрешность определения центра линии в любой области спектрального участка рабочей моды (длина моды  $\Delta\nu \sim 2,5 \text{ см}^{-1}$ ) была лучше  $2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ .

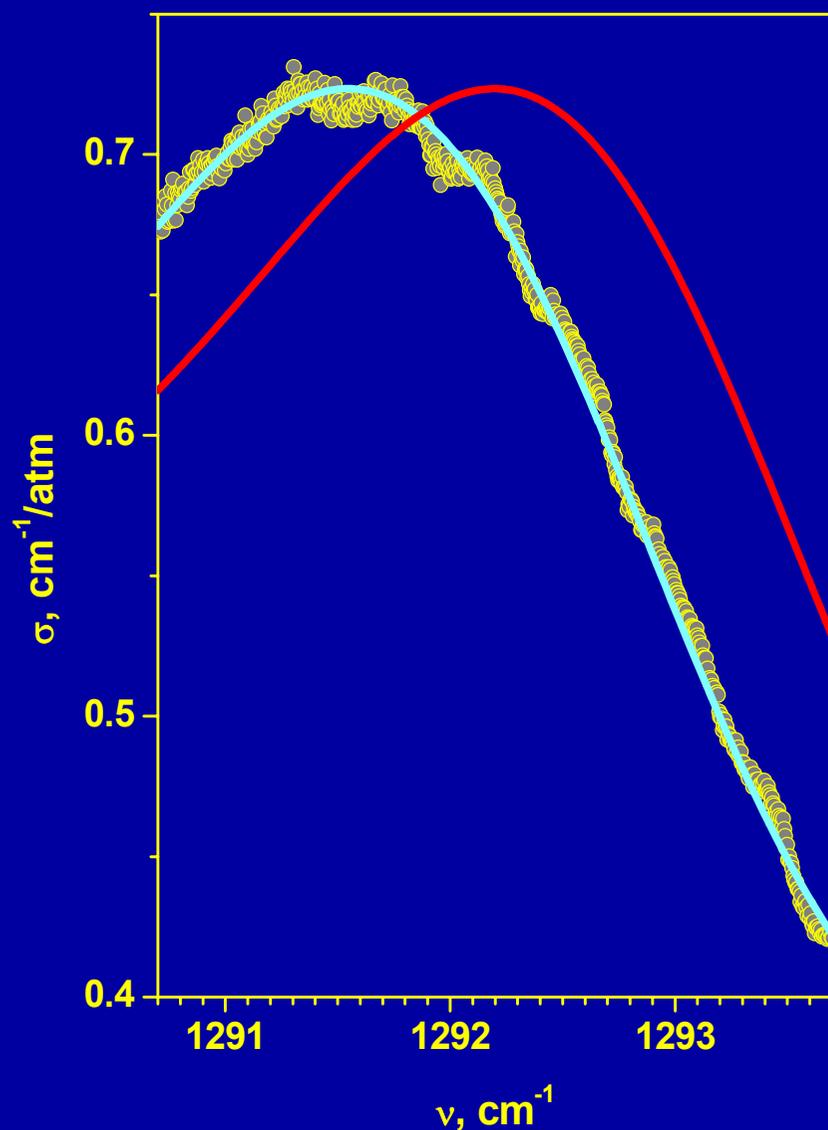
# Программное обеспечение

Для управления газоанализатором использовалась ЦАП/АЦП плата NI PCI-6110 фирмы "National Instruments". Частота дискретизации выборки в газоанализаторе 1 МГц, длина выборки - 2000, количество накоплений - от 1 до 255. Отношение сигнал/шум на входе АЦП составляло  $1-2 \cdot 10^4$ . Запись и обработка сигналов производилась при помощи программ, написанных с использованием драйверов фирмы National Instruments и вычислительного пакета NI LabView 7.1.



Вид программной оболочки для измерения изотоп состава  $UF_6$

# Диодная лазерная спектроскопия $\text{UF}_6$



Экспериментальный спектр поглощения гексафторида урана снятый газоанализатором (кружки), а также модельные спектры  $^{238}\text{UF}_6$  (проходит через кружки) и  $^{235}\text{UF}_6$  (сплошная кривая).

# Калибровочный тест газоанализатора ИЗОТОПНОГО ОТНОШЕНИЯ

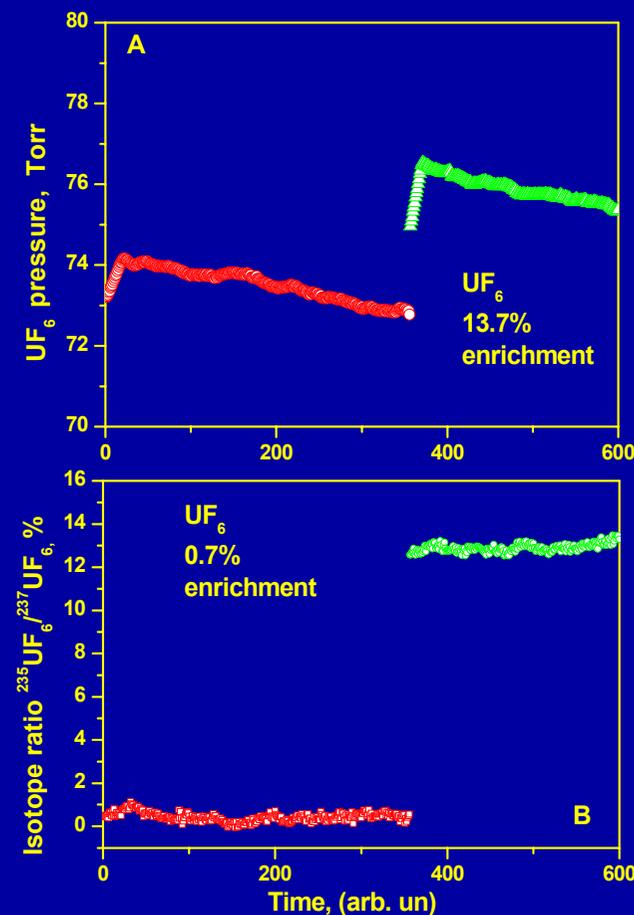
Для калибровки прибора использовались тестовые образцы с известным изотоп составом  $UF_6$ . На рисунке показаны результаты измерения двух образцов: естественного содержания (0,72%) и обогащенный (13,7%).

На верхней части рисунка (А) представлено изменение парциального давления во время измерения изотоп состава калибровочной пробы (В).

*МАГАТЭ, Сайсбердорф, Вена, Австрия, 2002 г.*

*(IAEA  $UF_6$  Loop in Seibersdorf, Vienna)*

*Точность измерения ограничивалась невысоким качеством лазера и приемников, и составила величину  $\sim 0,27\%$ .*



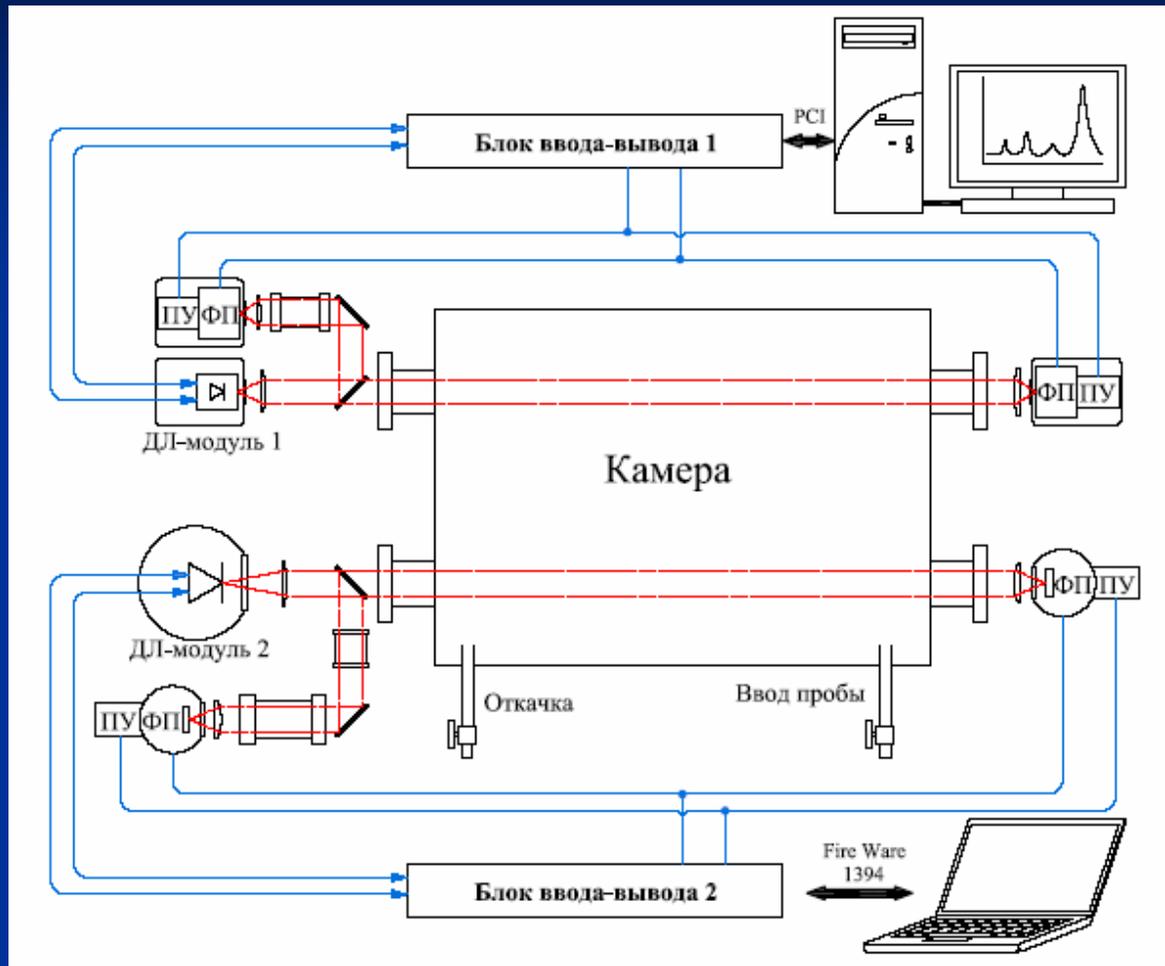
# Гидролиз $UF_6$ в атмосфере

- Летучий  $UF_6$  является одним из наиболее опасных компонентов аварийных выбросов на объектах ЯТЦ, представляющий собой химически активное соединение из всех известных фторсодержащих соединений урана. В случае аварийного выброса  $UF_6$  активно взаимодействует с атмосферной влагой, в результате чего образуются  $HF$ ,  $UO_2F_2$ :



- $HF$  являющийся маркером гидролиза  $UF_6$  может быть с высокой точностью регистрироваться с помощью диодных лазеров ближнего ИК диапазона (1.3 мкм).
- В связи с этим регистрация следовых количеств  $HF$  может стать актуальной для обнаружения утечек  $UF_6$  из контейнеров или во время технологического процесса, а также для обнаружения нелегального производства по обогащению урана.

# Блок схема газоанализатора для изучения гидролиза $UF_6$

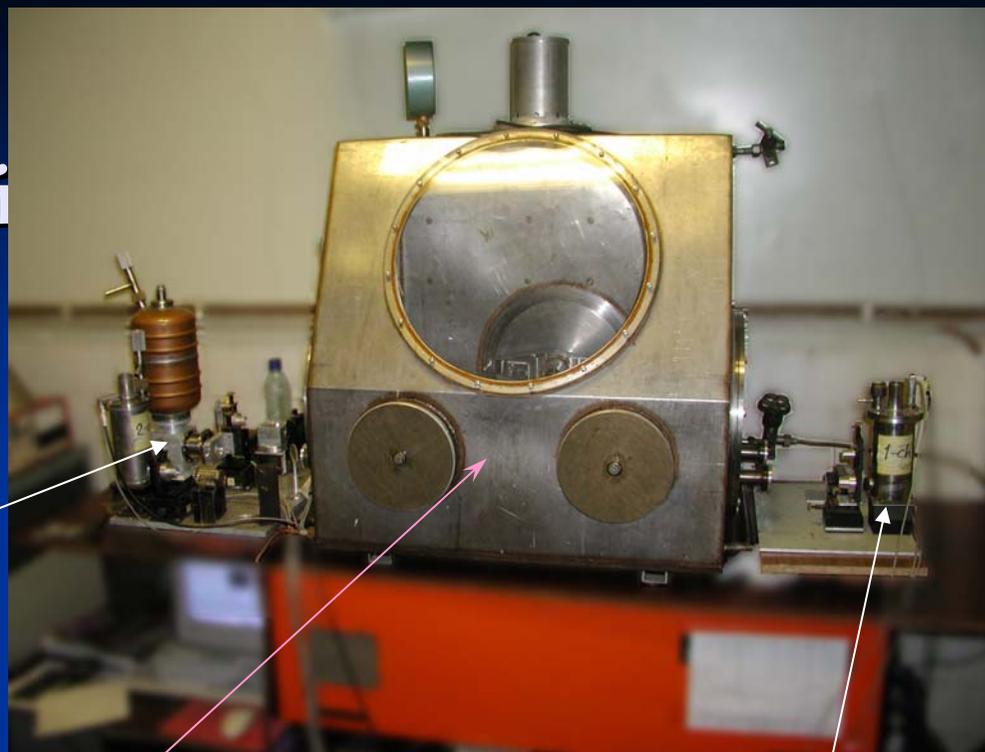


ДЛ – диодный лазер;  
ФП – фото приемник;  
ПУ – предусилитель;

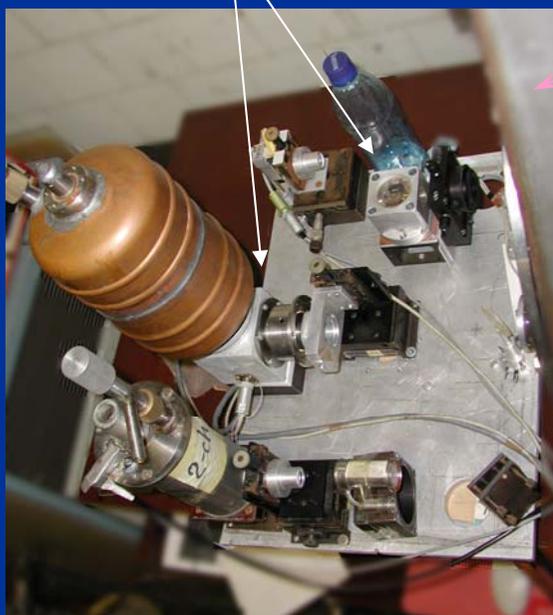
Ближний ИК – HF

Средний ИК –  $UF_6$

# Внешний вид экспериментальной установки



Диодные лазеры

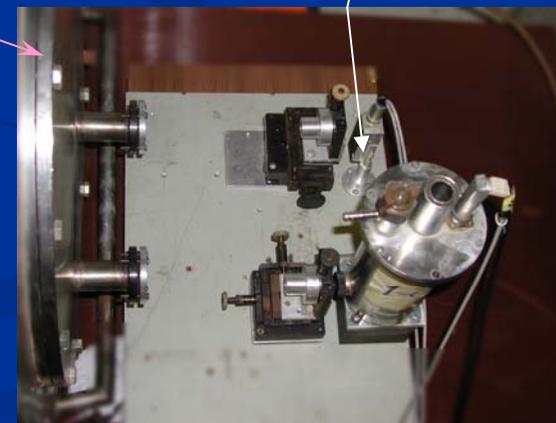


Вакуумированная камера

Фотоприемники

Канал регистрации – HF

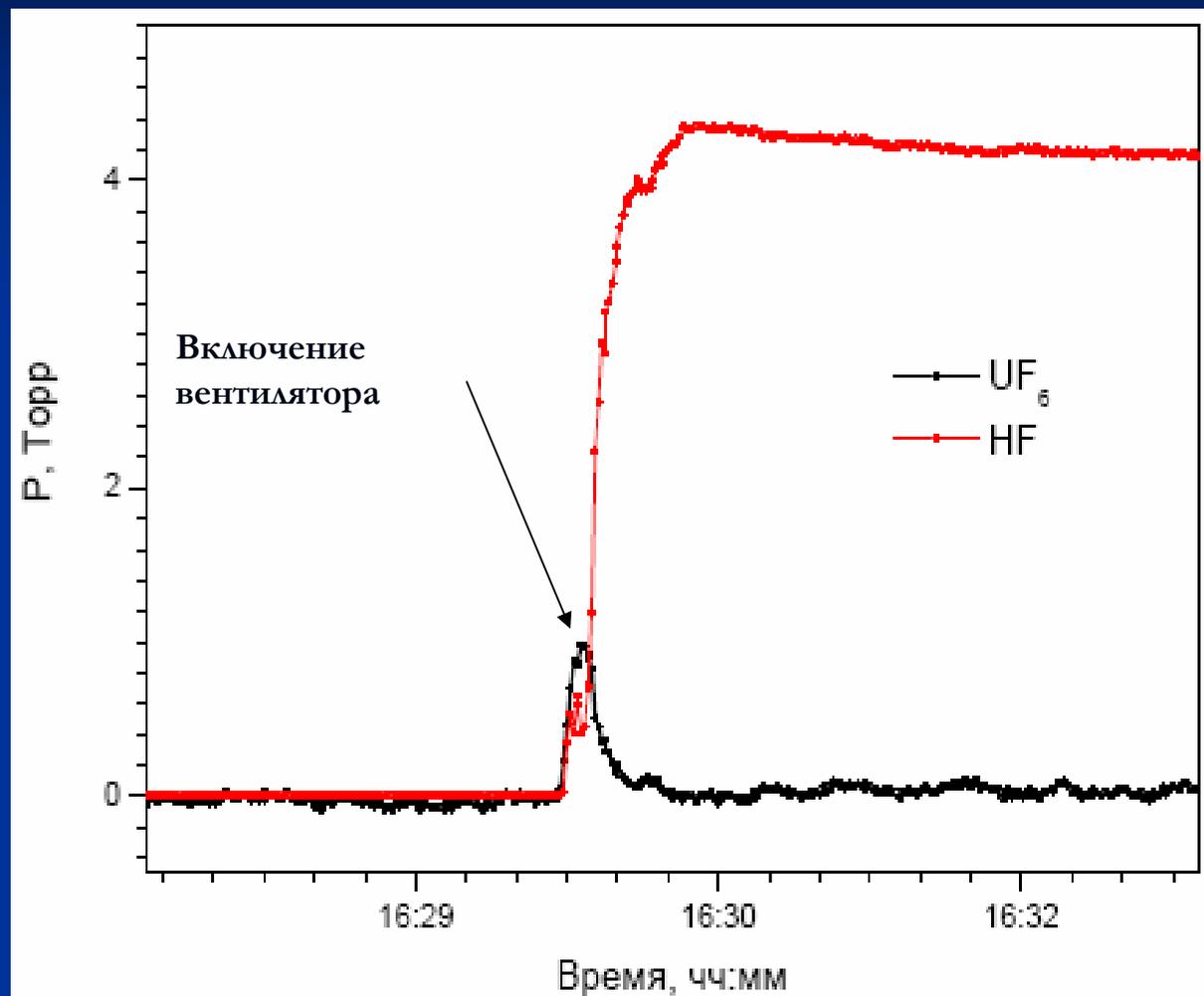
Канал регистрации –  $UF_6$





Одновременное измерение концентрации  $UF_6$  (слева) и HF (справа)

# Предварительные результаты эксперимента по гидролизу $\text{UF}_6$ в атмосфере



# ВЫВОДЫ

- Создан и прокалиброван лабораторный макет на базе ДЛ позволяющий измерять изотопный состав газообразного  $UF_6$  с погрешностью менее 0.27%.
- Проведен эксперимент по гидролизу  $UF_6$  в атмосфере с одновременной регистрацией гексафторида урана и фтористого водорода.
- При детектировании  $UF_6$  (ДЛ на 7.6 мкм) минимальная величина зарегистрированного поглощения пересчитывалась на оптическую трассу длиной  $\sim 50$  м и составила величину концентрации  $\sim 25$  ppt. При переходе в диапазон полосы  $\nu_3$  эта величина будет менее 0.4 ppt.
- Измеряемый порог концентраций для HF при использовании многоходовой кюветы Чернина С.М. и ДЛ ближнего ИК диапазона (1.31 мкм) составил величину менее 0.8 ppt.
- Зарегистрированные предельные величины концентраций  $UF_6$  и HF являются приемлемыми для мониторинга атмосферы вблизи объектов атомной промышленности.