

Квантовая оптика и фундаментальные шумы в ДЛС

А.И.Надеждинский

ЦЕНИ ИОФАН

Настоящее сообщение базируется на анализе материалов, представленных на Международной конференции TDLS – 2003, 2005, а также работах, проводимых в ЦЕНИ ИОФАН.

ДЛС в традиционных областях спектроскопии:

- измерение частот переходов
- интенсивности спектральных линий
- столкновительные уширения и сдвиги, контур линии
- аналитические и диагностические применения, в том числе измерение изотопического состава
- приборы на основе ДЛ и их применения

Незнание законов физики никого не освобождает от необходимости следования им

Введение

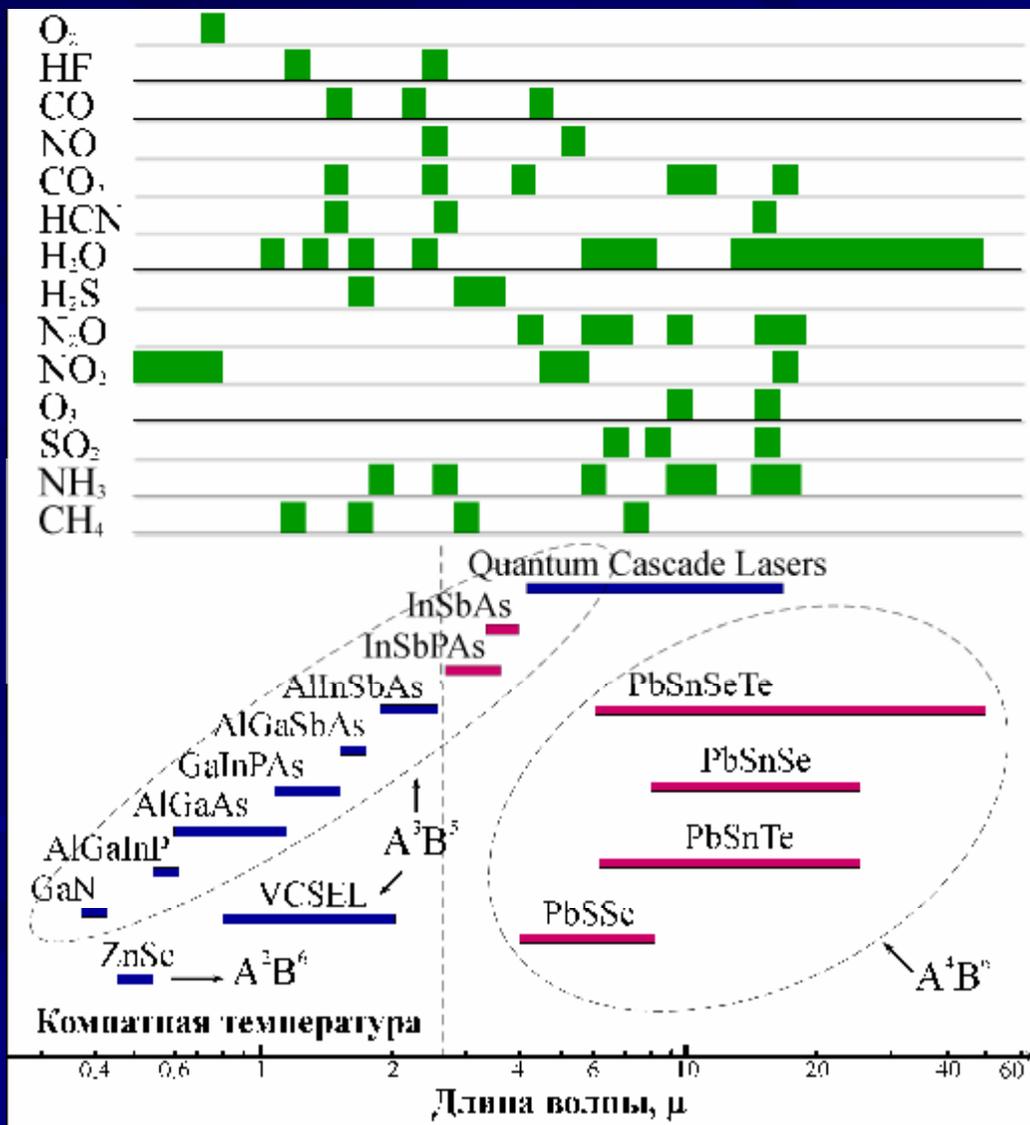
В последние годы наметился качественный прогресс в различных направлениях ДЛС (Диодной Лазерной Спектроскопии). Это относится к ряду технологических прорывов в технологии диодных лазеров (ДЛ), которые сделали этот тип лазеров в настоящее время достаточно доступными и надежными. Появился ряд новых экспериментальных методик ДЛС. В последние годы на первый план вышли аналитические применения ДЛС. Здесь был достигнут прорыв в повышении чувствительности метода, что открыло возможности широкого применения ДЛС, в том числе в областях, где вчера это было невозможно.

В этой связи, встал вопрос о предельных возможностях ДЛС и фундаментальных физических процессах, которые лимитируют эти возможности.

В настоящей работе будет показано, что фундаментальный предел ДЛС связан с квантовыми шумами излучения ДЛ и характеризуется следующими параметрами (для времени усреднения 1 сек): минимально обнаружимое поглощение – $6 \cdot 10^{-8}$; минимально обнаружимый коэффициент поглощения - $2 \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-1}$; минимально обнаружимая локальная концентрация – 0.8 ppt; минимально обнаружимая концентрация молекул – $8 \cdot 10^5 \text{ мол/см}^3$; минимально обнаружимая интегральная концентрация $120 \text{ ppt} \cdot \text{м}$ (осажденный слой – 0.12 нм).

Все это позволило поставить на повестку дня вопрос о необходимости массового применения ДЛС в различных областях науки и техники: охране окружающей среды, медицине, контроле в технологии и в случае чрезвычайных ситуаций и т.д. Будут приведены примеры ряда практических применений.

Полосы поглощения некоторых молекул и спектральные диапазоны работы различных ДЛ



Существующие в настоящее время типы Диодных Лазеров (ДЛ) перекрывают огромный спектральный диапазон от ближнего УФ до ТГц диапазона, где располагаются полосы поглощения различных молекул. Это позволяет на единой аппаратной и методической основе обеспечить детектирование их следовых количеств, используя единые аппаратные и методические средства

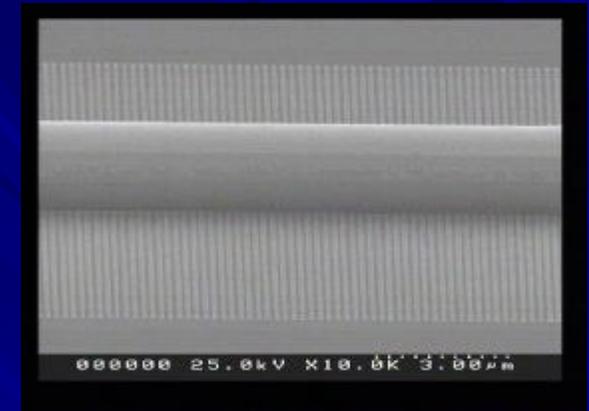
Новое в разных типах ДЛ

- АЗВ5
- А4В6
- А2В6
- диодные лазеры
- новый тип РОС
- VCSEL
- квантово-каскадные лазеры
- ДЛ + волокно
- волоконные усилители

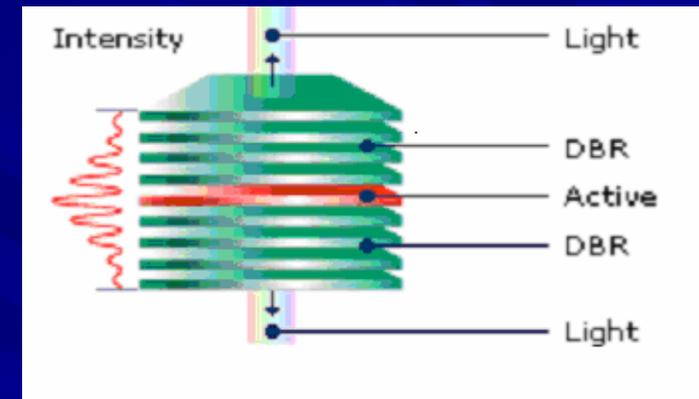
В настоящий момент можно сказать, что большие ожидания, связанные с квантово-каскадными лазерами, не оправдались.

Представляется, что большое будущее принадлежит ДЛ ТГц диапазона.

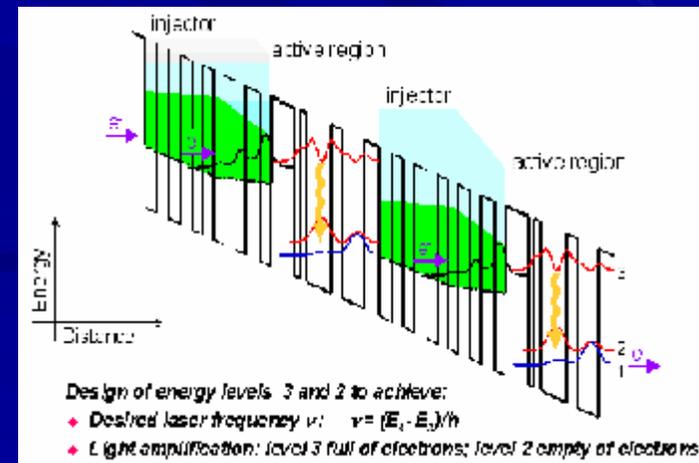
Новый тип РОС ДЛ



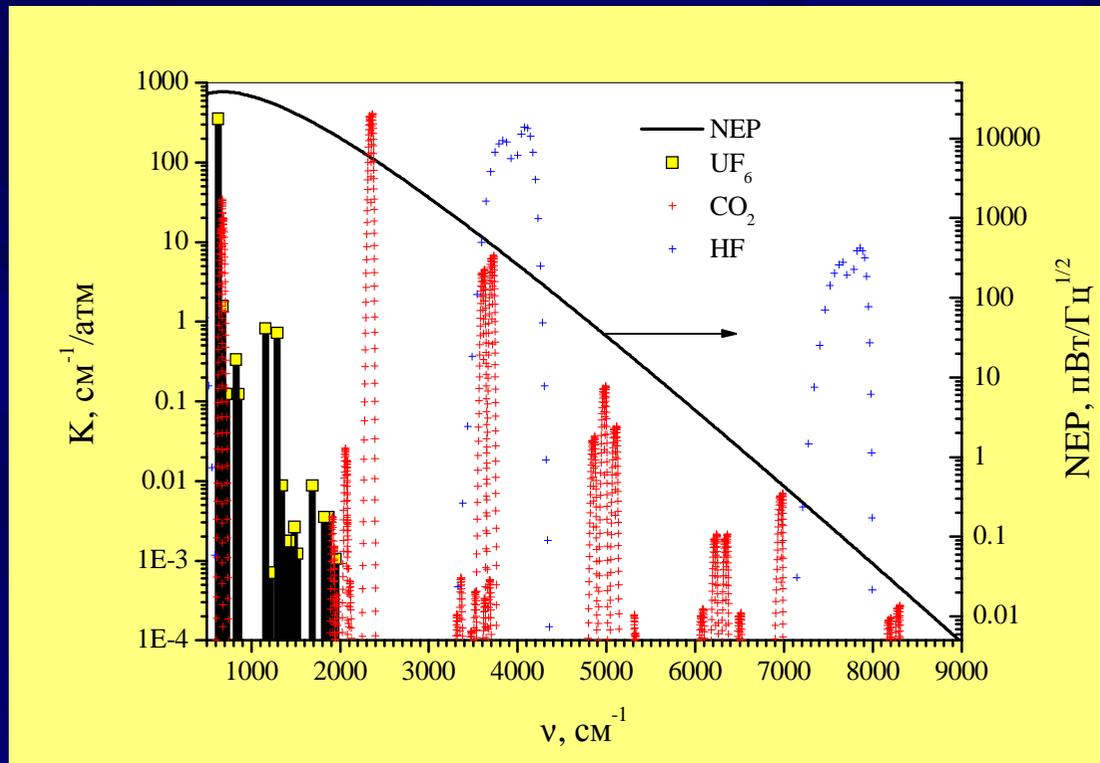
VCSEL
1.5-2 μ



Квантово-каскадные лазеры
3-20 μ



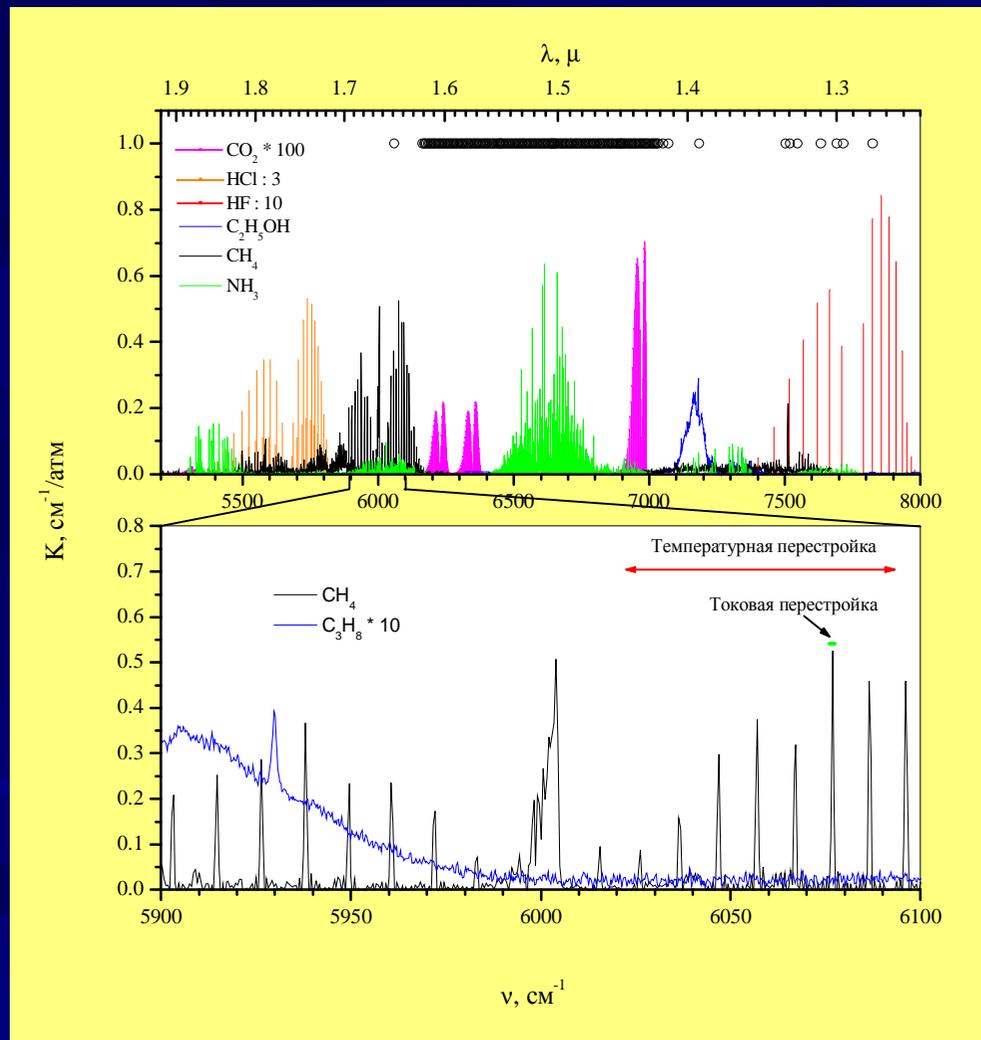
Выбор оптимального спектрального диапазона



Традиционно считается, что наилучшим с точки зрения детектирования следовых концентраций молекулярных микропримесей является средний ИК диапазон, в котором располагаются фундаментальные полосы поглощения

Одновременный анализ физических свойств молекул, диодных лазеров и фотоприемников показывает, что оптимальной является ближняя ИК область спектра, в которой располагаются обертона и составные полосы поглощения различных молекул.

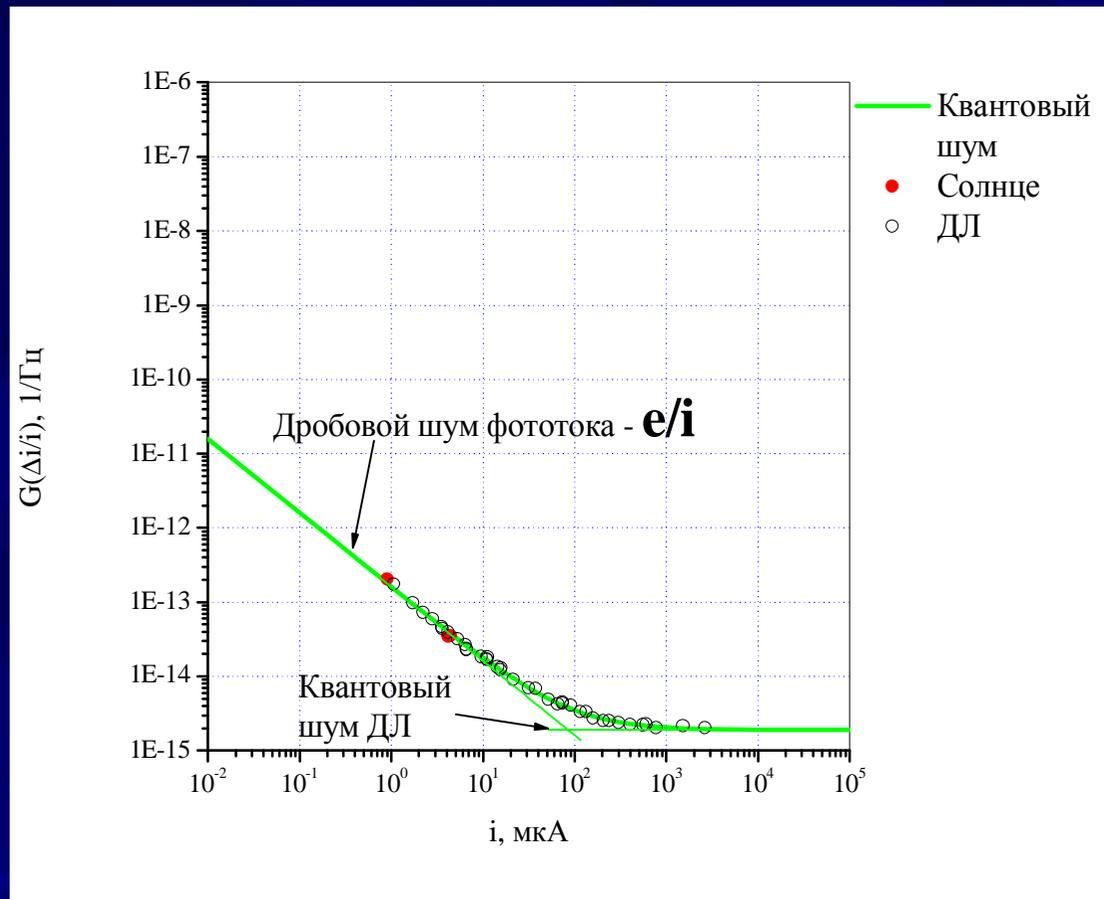
Диодные лазеры и спектры молекул в ближнем ИК диапазоне



Практически все молекулы имеют полосы поглощения в между 1 и 2 мкм. Расположенные в этом спектральном диапазоне молекулярные полосы поглощения являются характеристическими для связей С-Н, О-Н, N-Н и т.д. Здесь же работают выпускаемые промышленностью диодные лазеры (кружки), что обеспечивает возможность детектирования различных молекул.

Спектры метана и пропана в области С-Н связи около 1.65 мкм демонстрируют селективность метода, которая превышает 10000.

Шумы системы ДЛ – фотоприемник

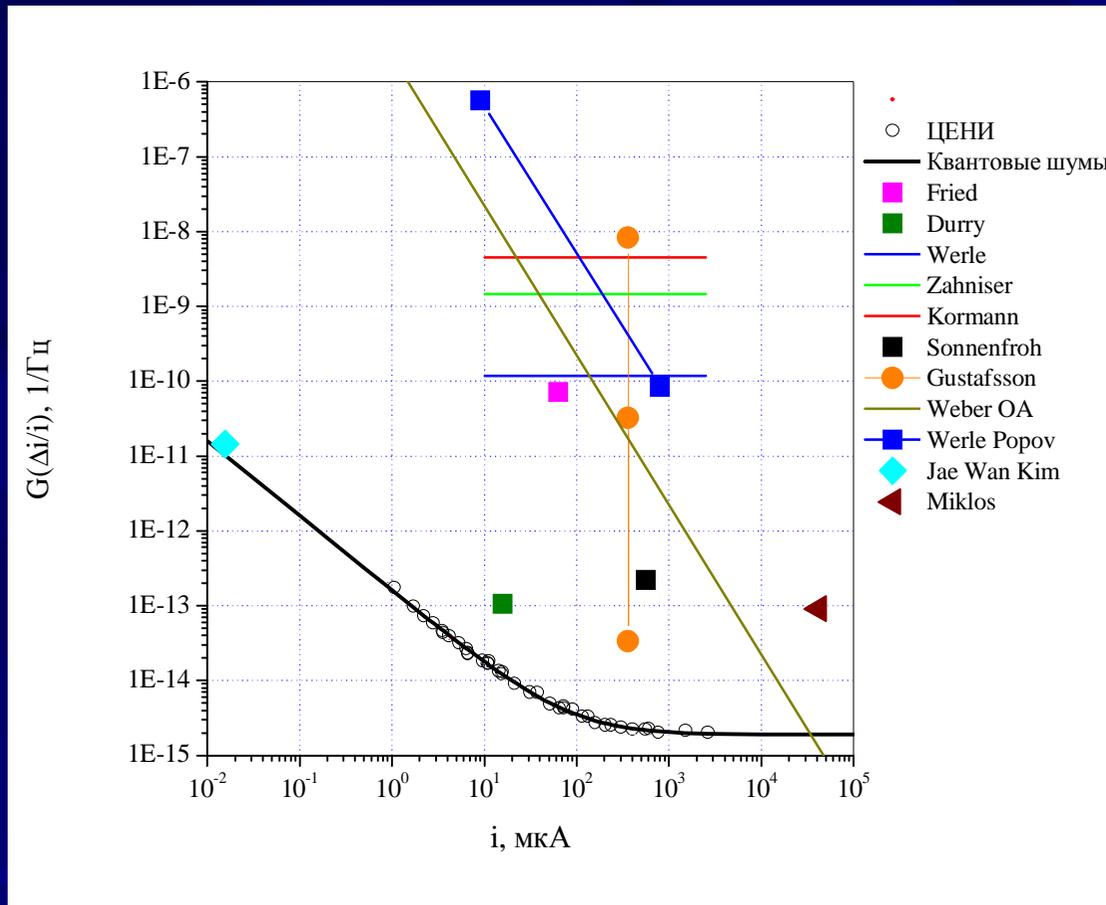


Зеленая сплошная кривая описывает теоретический предел чувствительности, обусловленный дробовыми шумами фототока и квантовыми шумами излучения ДЛ.

Зависимость спектральной плотности относительных шумов фототока от его величины.

В настоящее время достигнут фундаментальный предел чувствительности, обусловленный дробовыми шумами фототока и квантовыми шумами излучения ДЛ

Шумы системы ДЛ – фотоприемник

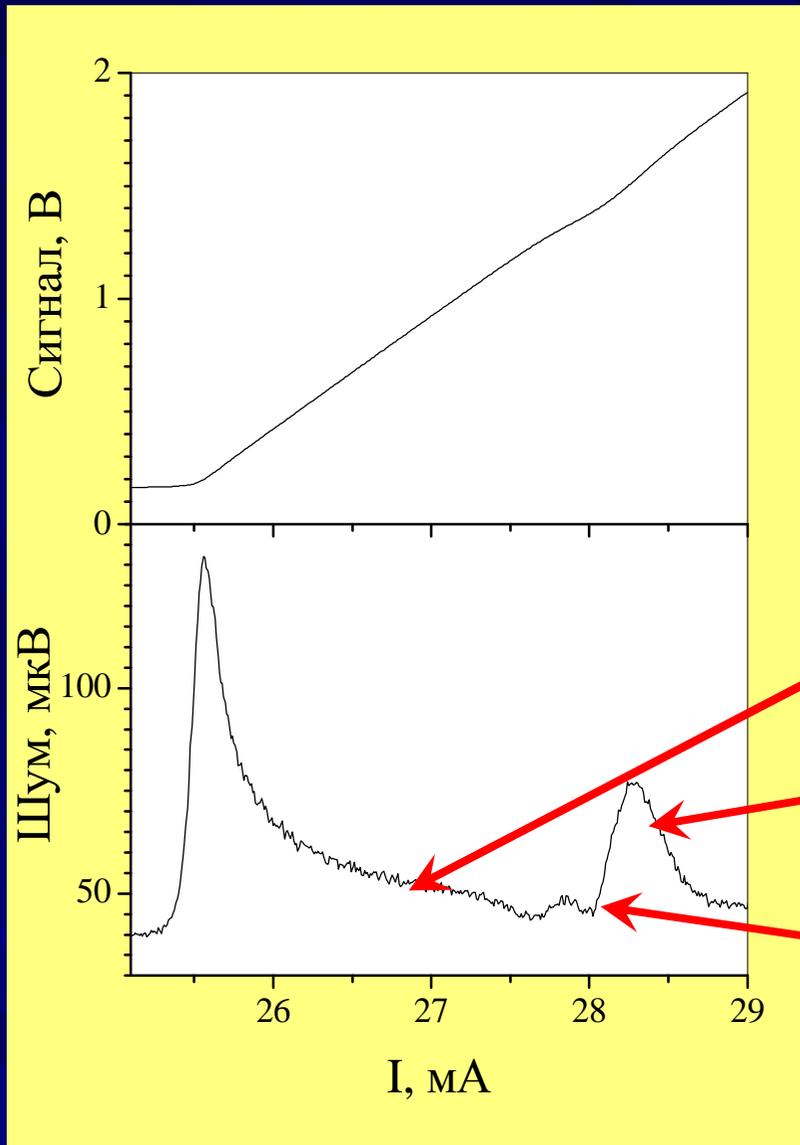


Черная сплошная кривая описывает теоретический предел чувствительности, обусловленный дробовыми шумами фототока и квантовыми шумами излучения ДЛ.

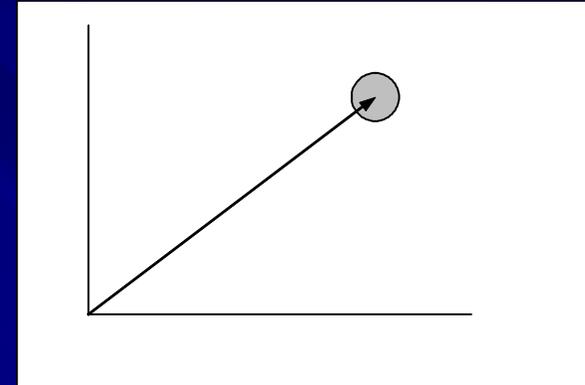
Зависимость спектральной плотности относительных шумов фототока от его величины. Приведены данные работ, в которых получены наилучшие результаты, известные к настоящему времени

No comments

Квантовые шумы излучения ДЛ



Зависимость сигнала и его шумов от тока накачки ДЛ вблизи порога генерации



Вектор – вынужденное излучение

Кружок – спонтанное излучение

Шумы интенсивности

Шумы частоты

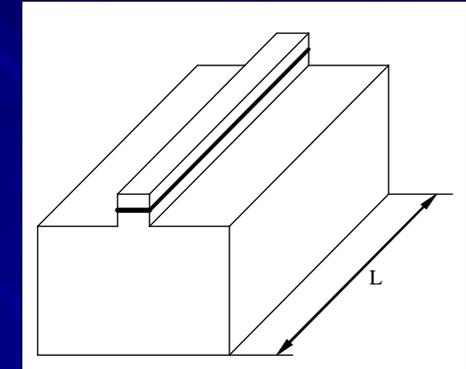
Корреляция шумов частоты и интенсивности

При значительном превышении над порогом шумы излучения ДЛ не зависят от величины превышения

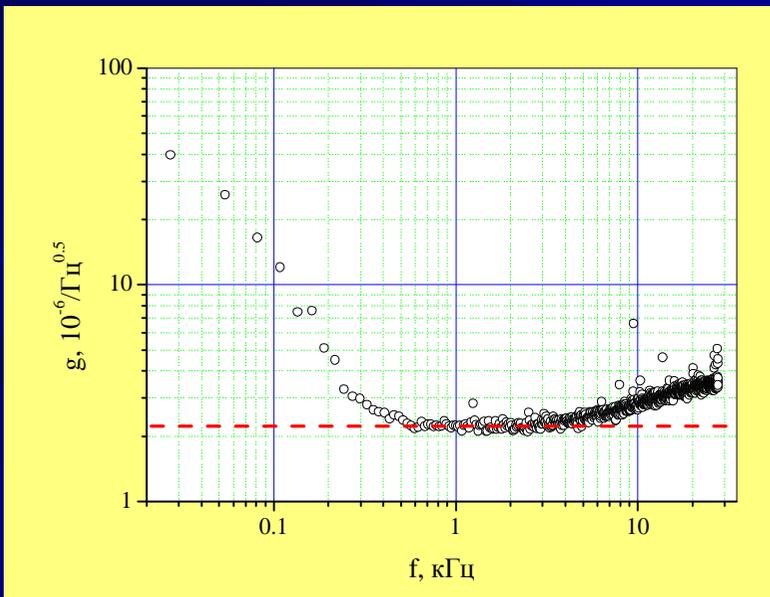
Шумы излучения ДЛ, обусловленные флуктуациями плотности тока накачки

Причина: Флуктуации плотности тока накачки ДЛ.

Механизм: Флуктуации плотности тока накачки приводят к флуктуирующему распределению тепловых источников в активной области ДЛ, на его контактах, а также по всему лазеру. Вследствие термо-диффузии в течение 10 мкс тепловое равновесие устанавливается поперек активной области, а после 1 мс начинает ощущаться влияние контактов и флуктуаций в самом ДЛ.



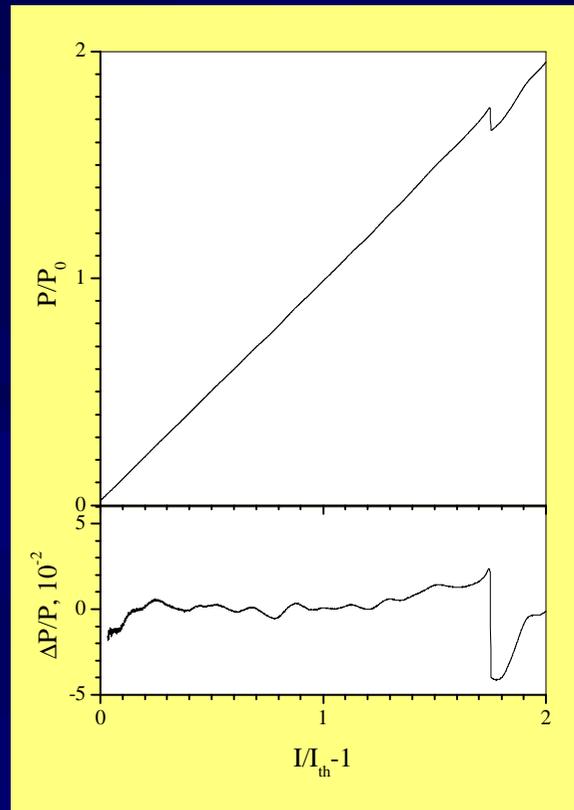
Следствием этого механизма являются флуктуации интенсивности и частоты ДЛ, а также его ближнего и дальнего поля излучения



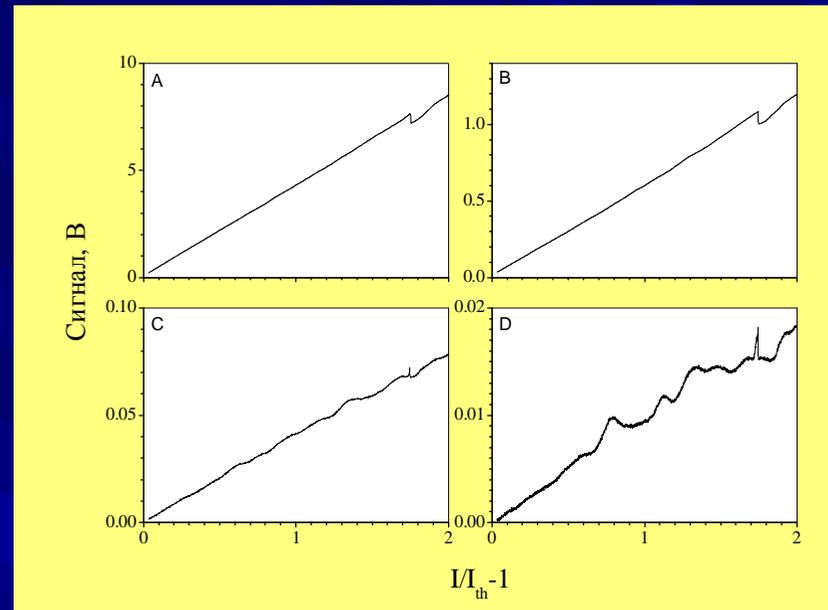
Спектр шумов фототока, обусловленный флуктуациями частоты ДЛ. Постоянная величина обусловлена квантовыми шумами частоты ДЛ, высокочастотная область демонстрирует роль флуктуаций в активной области лазера, при низких частотах доминируют флуктуации в контактах.

Вывод: Все измерения должны быть произведены между 10 мкс и 1 мс

Неоднородность лазерной структуры



Зависимость регистрируемого сигнала (вверху) и базовой линии (внизу) от тока накачки, когда практически все излучение было сфокусировано на ФД.

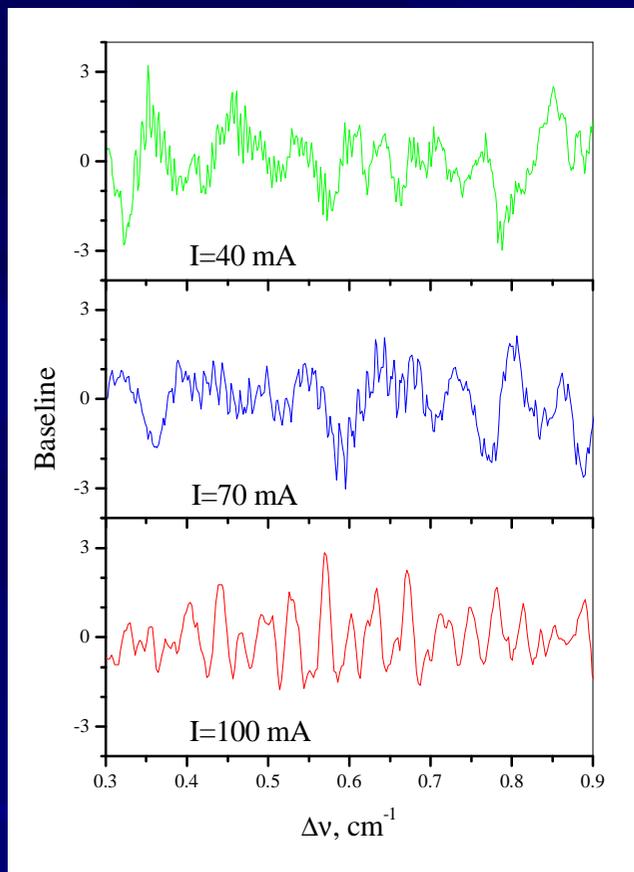


Зависимость сигнала от тока накачки при установке ФД в различные места диаграммы излучения ДЛ.

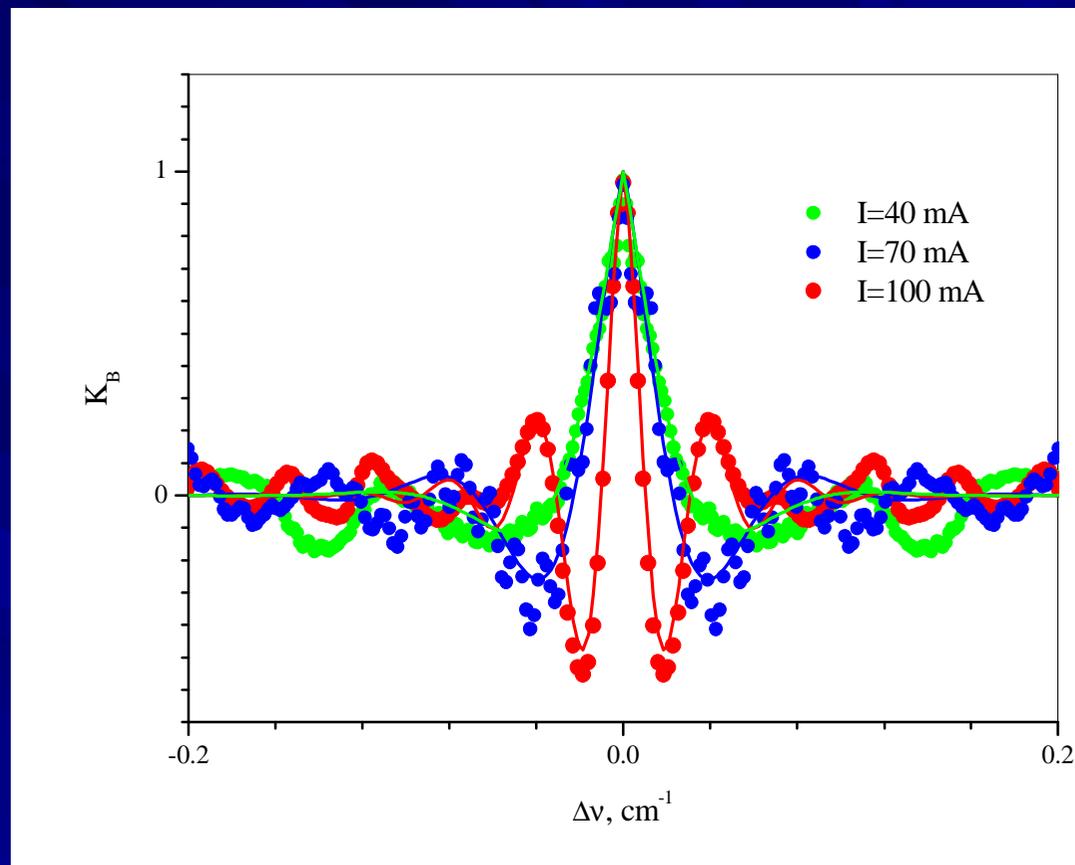
Причина: мелкомасштабная структура ближнего поля излучения ДЛ и ее эволюция во времени.

Вывод: отказ от жесткой фокусировки, установка ФД в оптимальную точку диаграммы.

Базовая линия и ее автокорреляционная функция

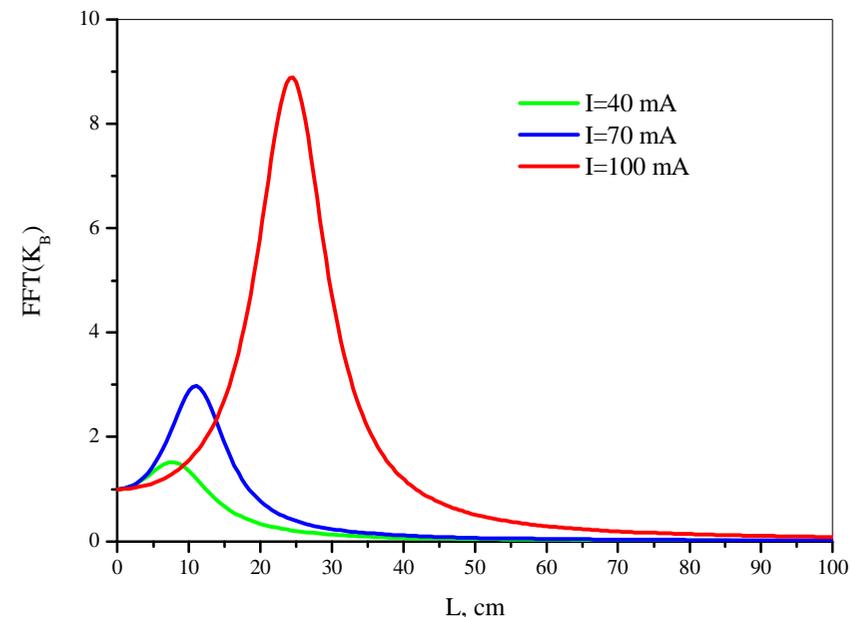
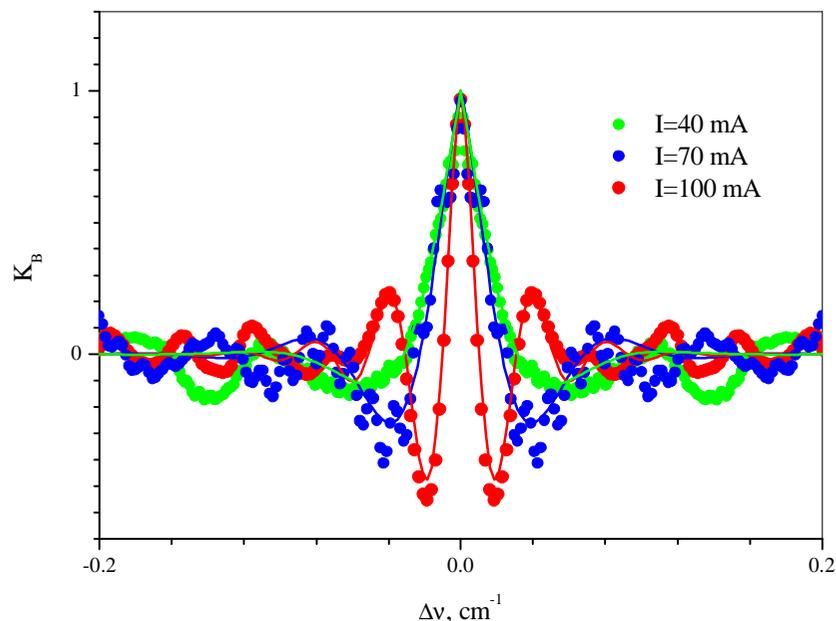


Изменение структуры базовой линии при изменении тока накачки ДЛ. Приведены значения базовой линии, нормированные на ее std.



Корреляционные функции приведенных базовых линий и их подгонка

О природе базовой линии



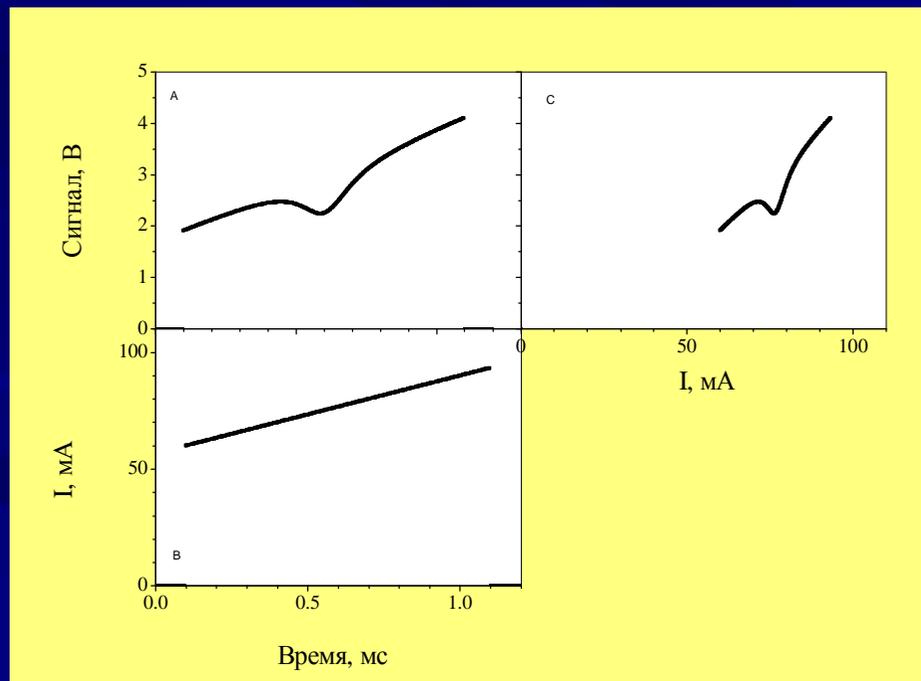
Корреляционные функции базовых линий для разных токов накачки ДЛ и их подгонка

Фурье преобразование корреляционных функций базовых линий для различных токов накачки ДЛ

Вывод: природа базовой линии связана с неоднородностями в активной области ДЛ, а ее свойства определяются диффузией в системе носители тока – фотоны в активной среде ДЛ (“релаксационные колебания”)

История развития режимов работы

1 поколение	Сначала усреднение сигнала, а потом сканирование частоты ДЛ	Гармоническая модуляция тока накачки + $2f$ детектирование Импульсно-периодический режим ДЛ + стробоскопическое детектирование
2 поколение	Традиционный Sweep integration	Импульсно-периодический режим ДЛ. Регистрация каждого импульса, а затем усреднение реализаций



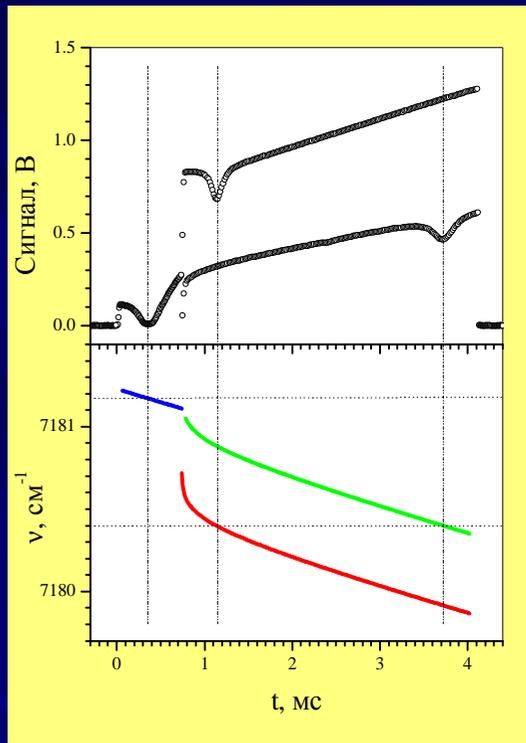
Традиционный режим работы при накачке ДЛ импульсом тока трапецевидной формы

Современные режимы работы

3 поколение

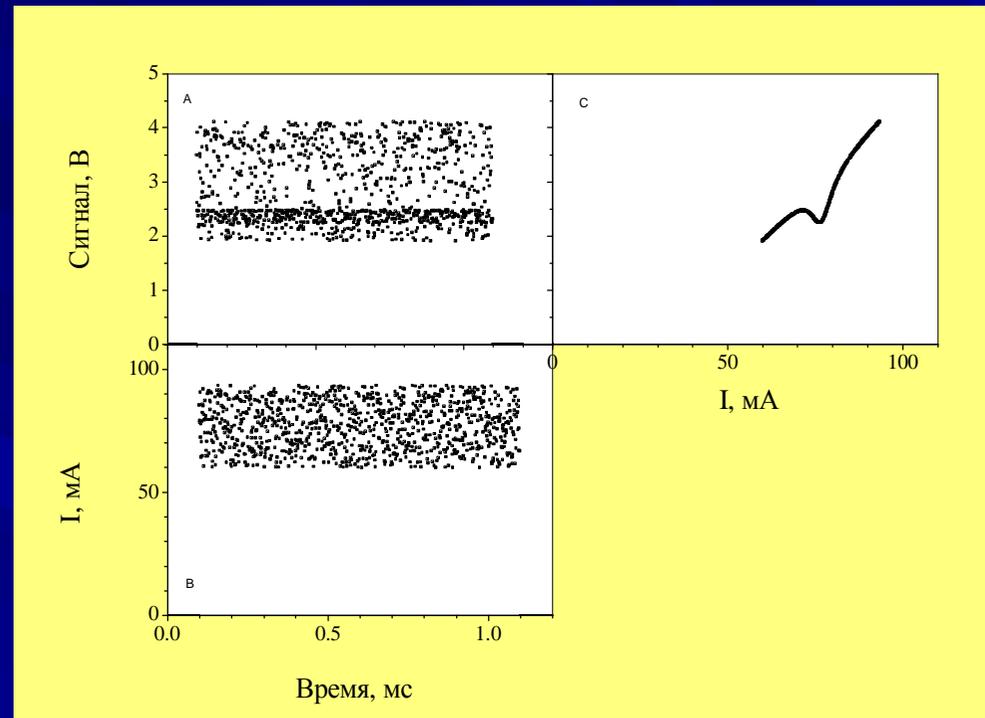
Ток накачки
специальной
формы

Импульсно-периодический режим ДЛ.
Регистрация каждого импульса, а затем
усреднение реализаций



Временная зависимость сигнала (вверху)
и частоты излучения ДЛ (внизу).

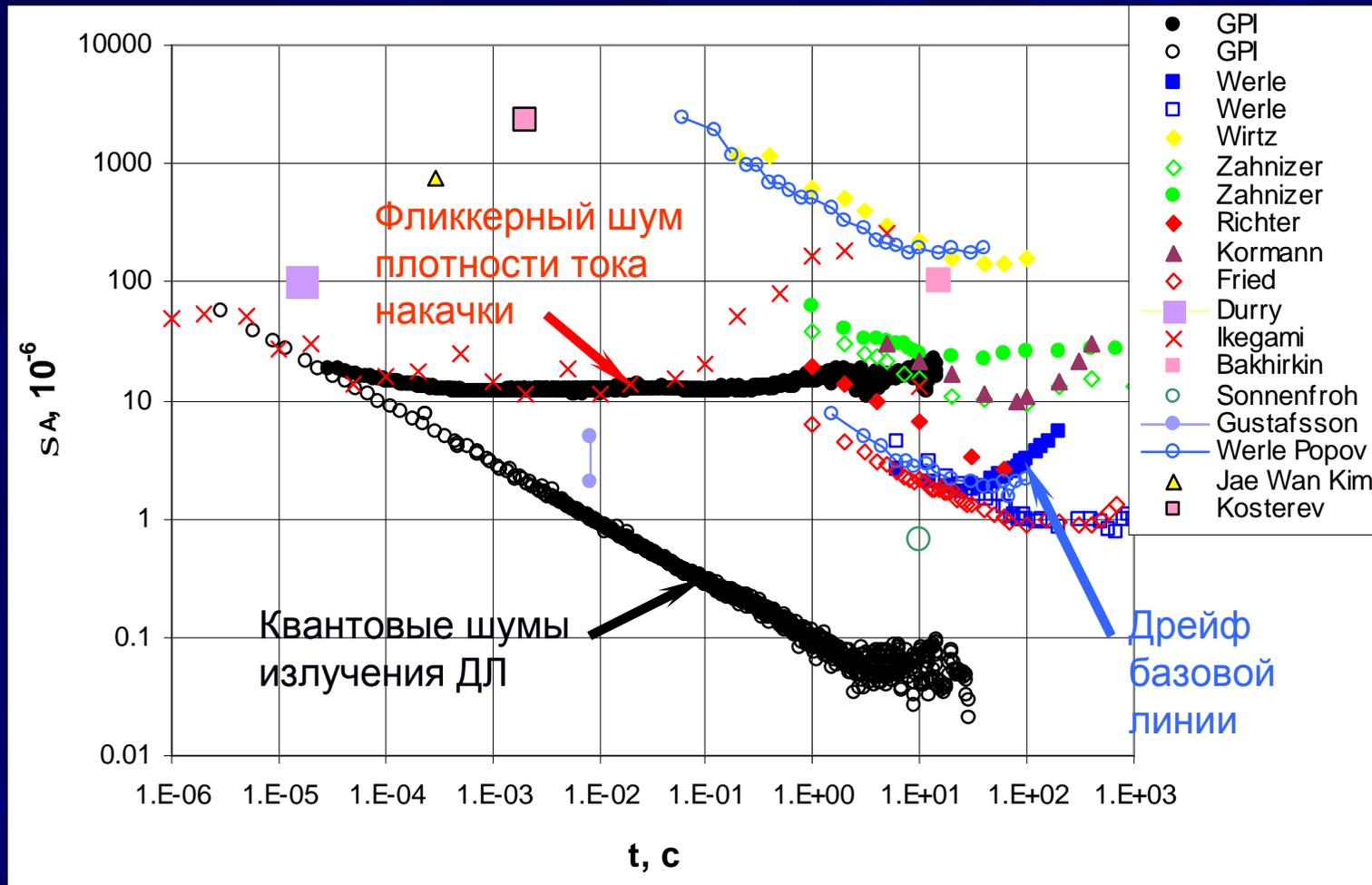
*Это выглядит как двухчастотный
режим работы ДЛ со сканированием
частоты.*



Режим работы с модуляцией тока накачки
белым шумом.

*Здесь возможно использование фильтрации и
во временном и в частотном представлении*

Регистрация поглощения на уровне 10^{-7}



Зависимость отклонение Аллана σ_A относительных шумов фототока от времени усреднения. Показаны лучшие результаты, достигнутые к настоящему времени, а также основные механизмы, лимитирующие чувствительность

Система измерения локальной концентрации молекулярных микропримесей с помощью многоходовой кюветы в открытой атмосфере.



Система измерения среднего содержания молекулярной примеси внутри движущегося автомобиля.

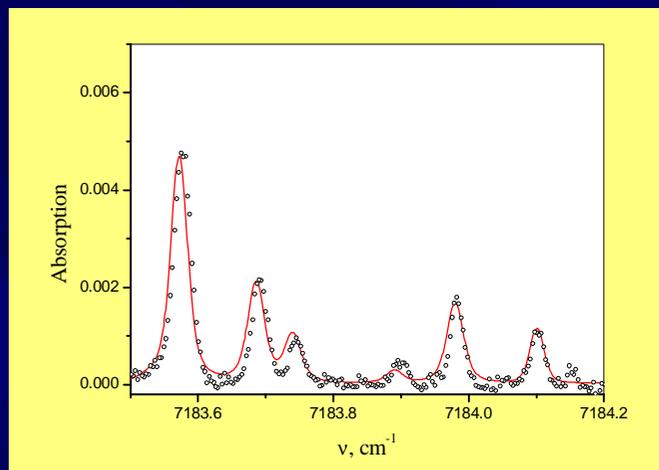


Система измерения среднего содержания молекулярной примеси в атмосфере для вертолета.



Измерения изотопического состава

H₂O



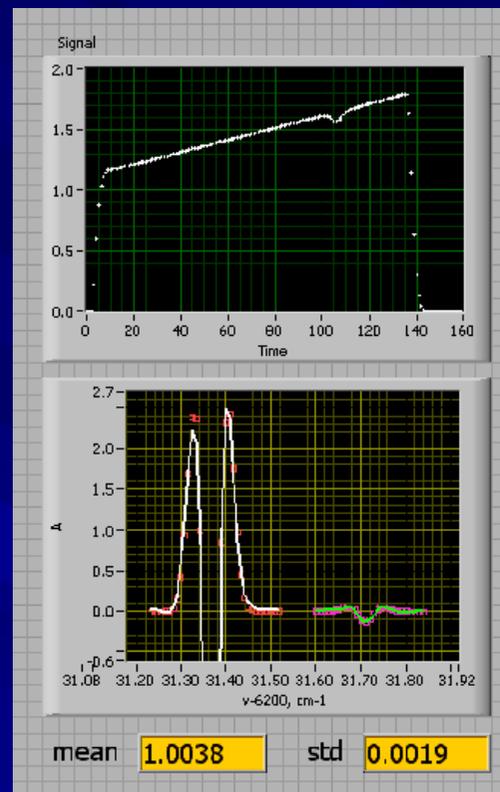
H¹⁶OH - 99.51 %

H¹⁷OH - 0.05 %

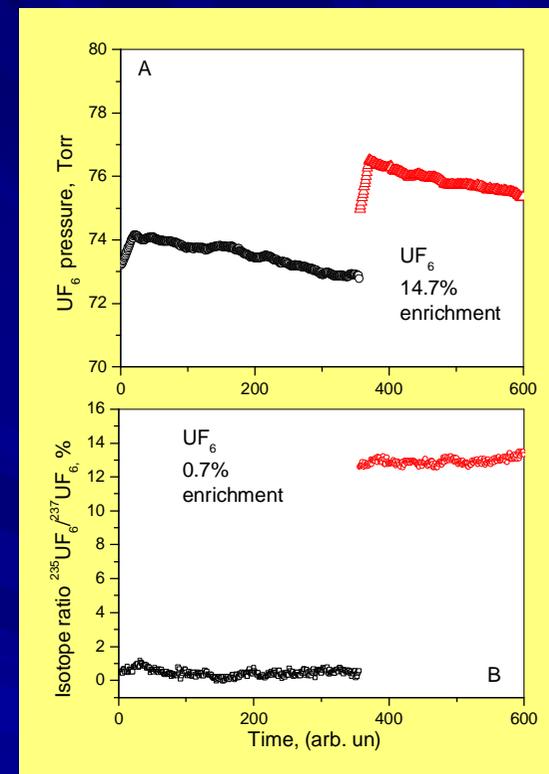
H¹⁸OH - 0.23 %

H¹⁶OD - 0.21 %

CO₂



UF₆



Минимально обнаружимое поглощение 10^{-6} - 10^{-8} ограничено

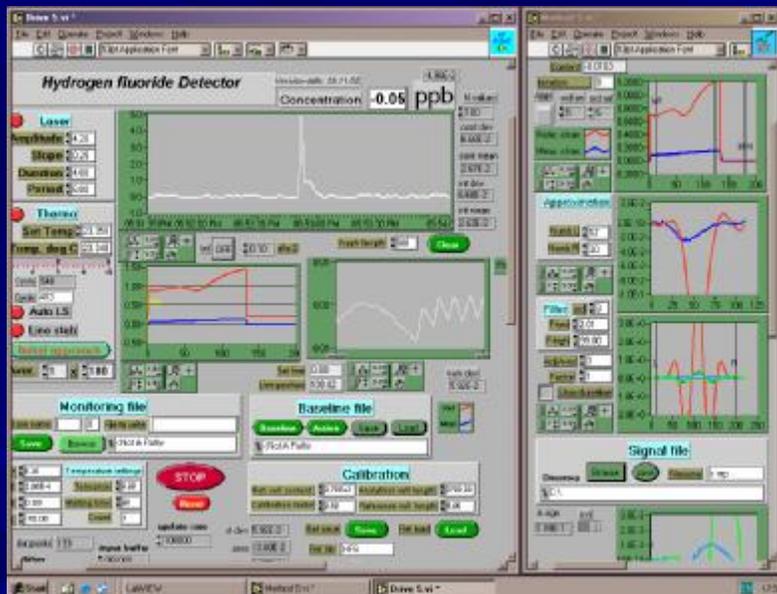
Квантовыми шумами
интенсивности ДЛ

Квантовыми шумами
частоты ДЛ

Измерение локальной концентрации

Прибор, измеряющий следовые концентрации молекул в открытой атмосфере

Внешний вид прибора

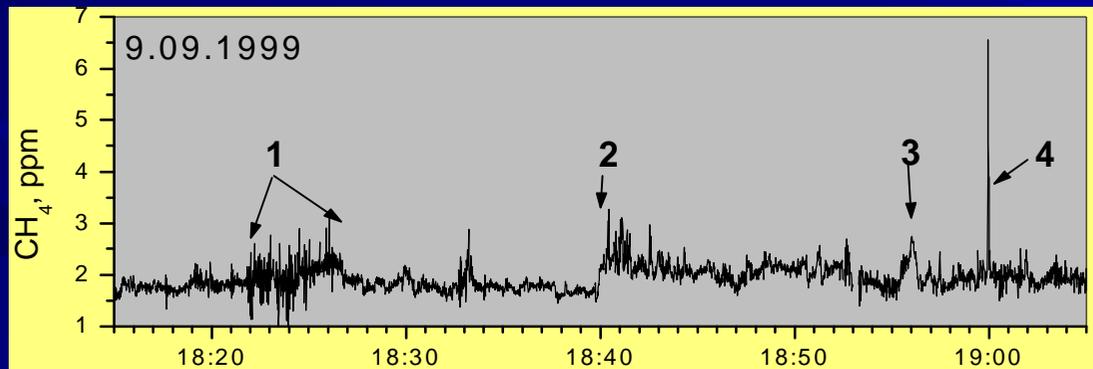
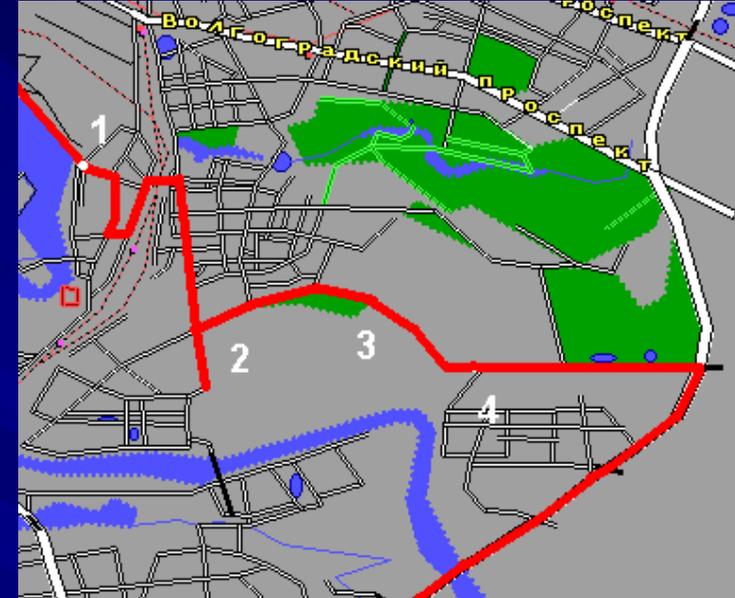


Основные параметры

Молекула	λ, μ	C, ppt	τ, c
метан	1.65	44	0.3
HF	1.31	3	0.3
NO ₂	0.67	0.8	0.3

Программный интерфейс

Детектирование содержания метана



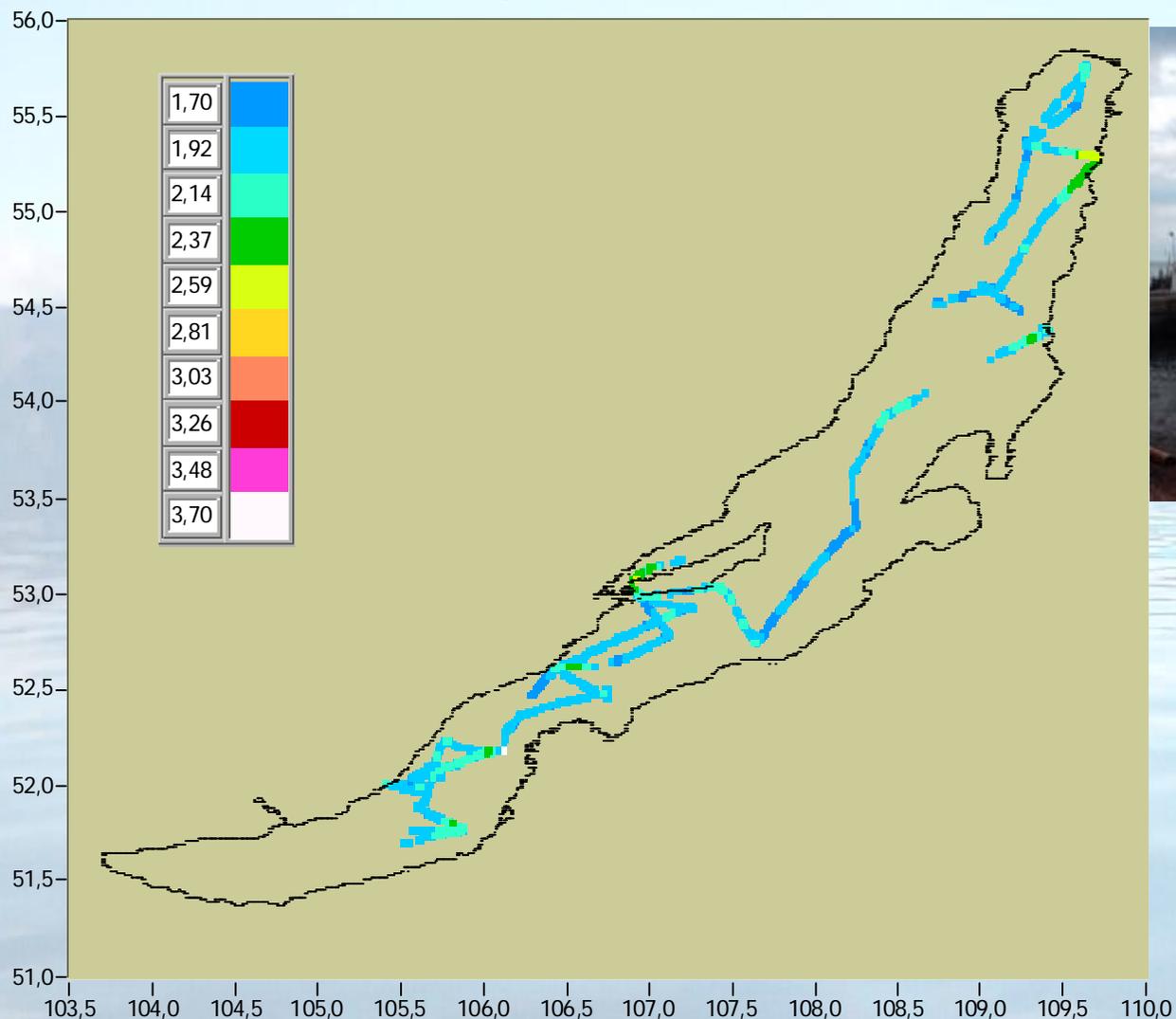
Детектирование содержания метана
9.09.99 вблизи взорванного дома в
Печатниках:

- 1 – Прибор измеряет содержание метана вблизи взорванного дома.
- 2 – Поля аэрации
- 3 – Свалка
- 4 – Утечка газа

пространственное распределение метана над Байкалом

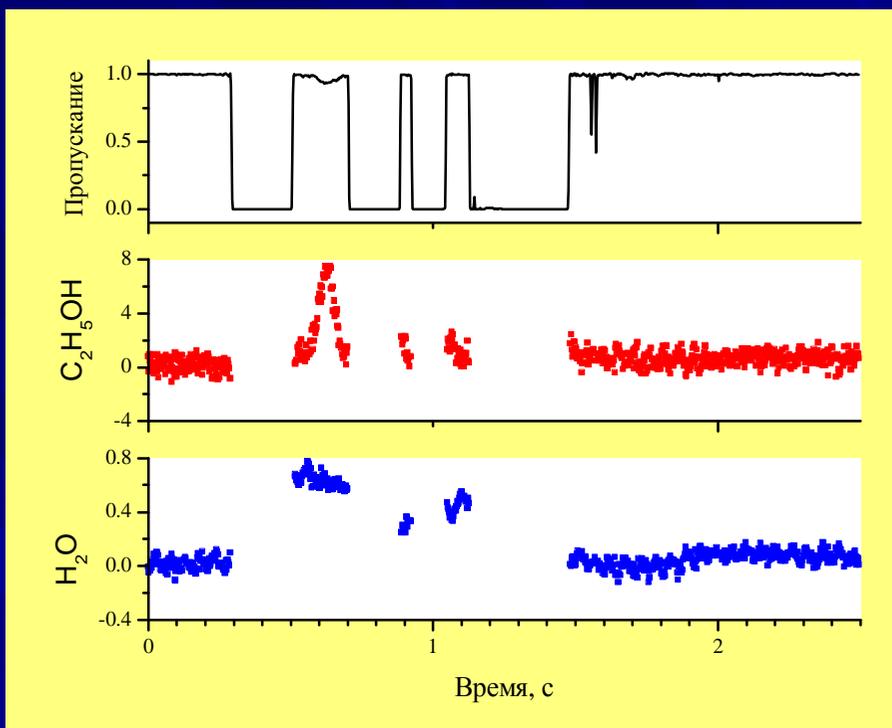
В.А.Капитанов, И.С.Тырышкин, Н.П.Кривошлужский, Ю.Н.Пономарев

Институт оптики атмосферы, СОРАН, Томск



**Комплексное
исследование
естественных газовых
выходов озера Байкал
(INTAS 01-2309)**

Измерения на открытой трассе



Одновременное детектирование содержания паров этилового спирта (сложная органическая молекула) и воды внутри движущегося автомобиля

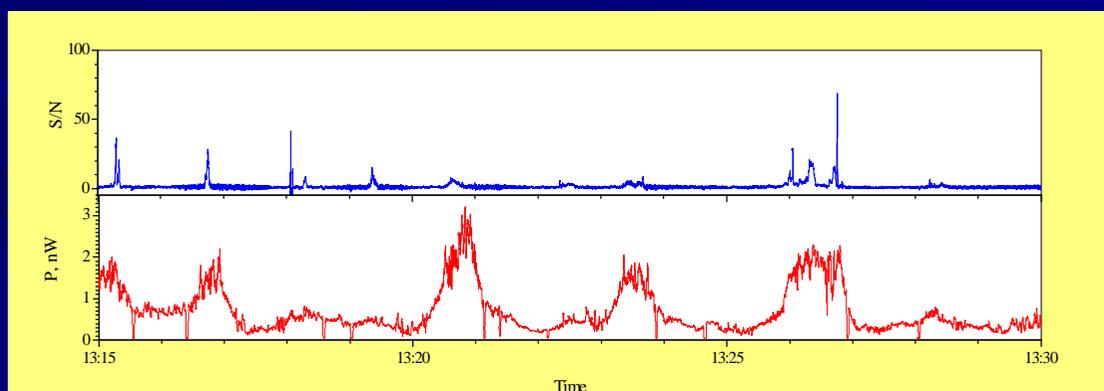
Комплекс вертолетного базирования



Тестовые полеты
сентябрь-ноябрь 2002
Торжок, Краснодар
май-июль 2003
Екатеринбург

нФрагмент детектирования
утечек метана из
газопровода (вверху).

нВнизу - величина
регистрируемого лазерного
излучения. Вариации этой
величины обусловлены
изменениями высоты
полета и отражательной
способности поверхности.

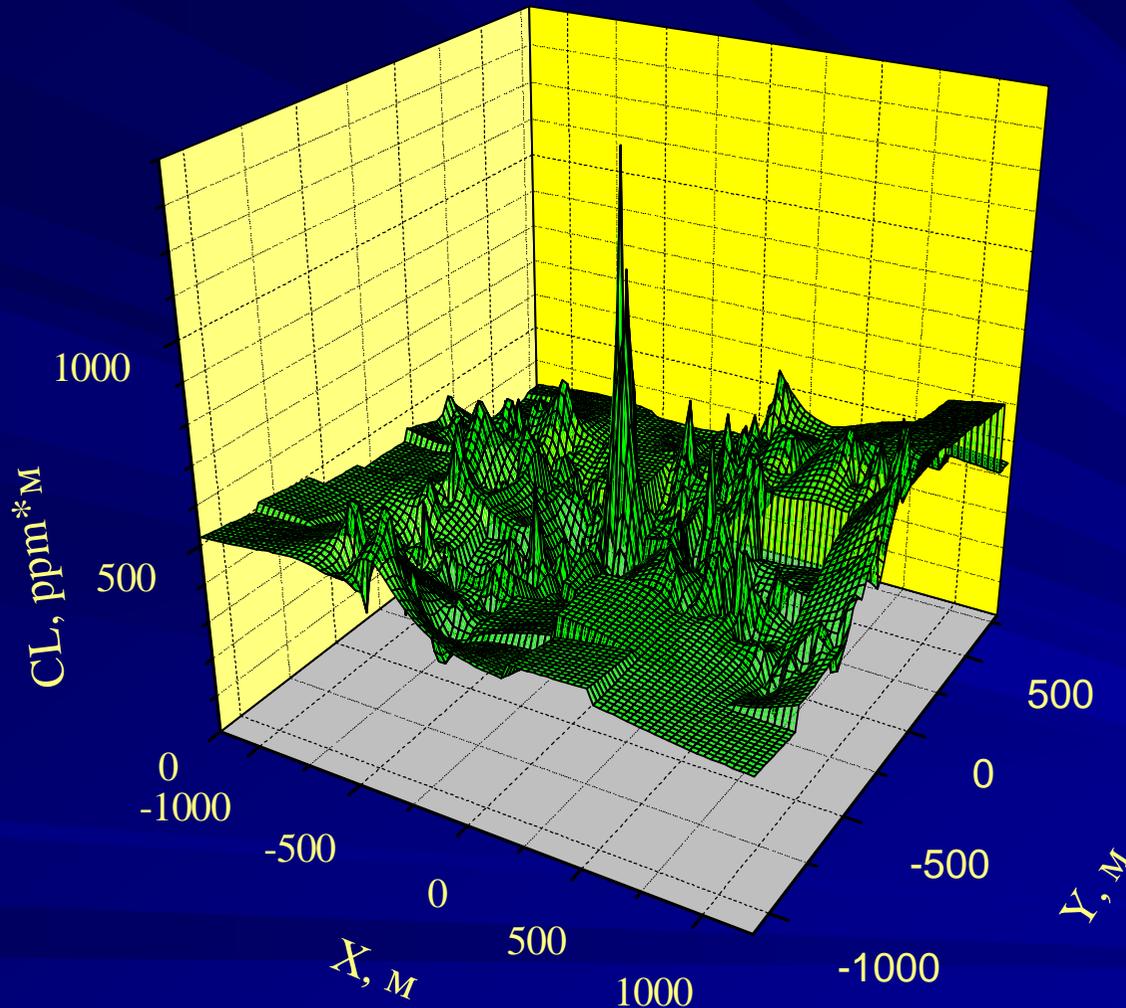


Дистанционный детектор молекулярных микропримесей



Внешний вид

Тестовый полет

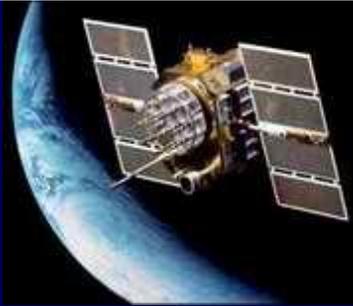


Прибор был оборудован системой GPS.

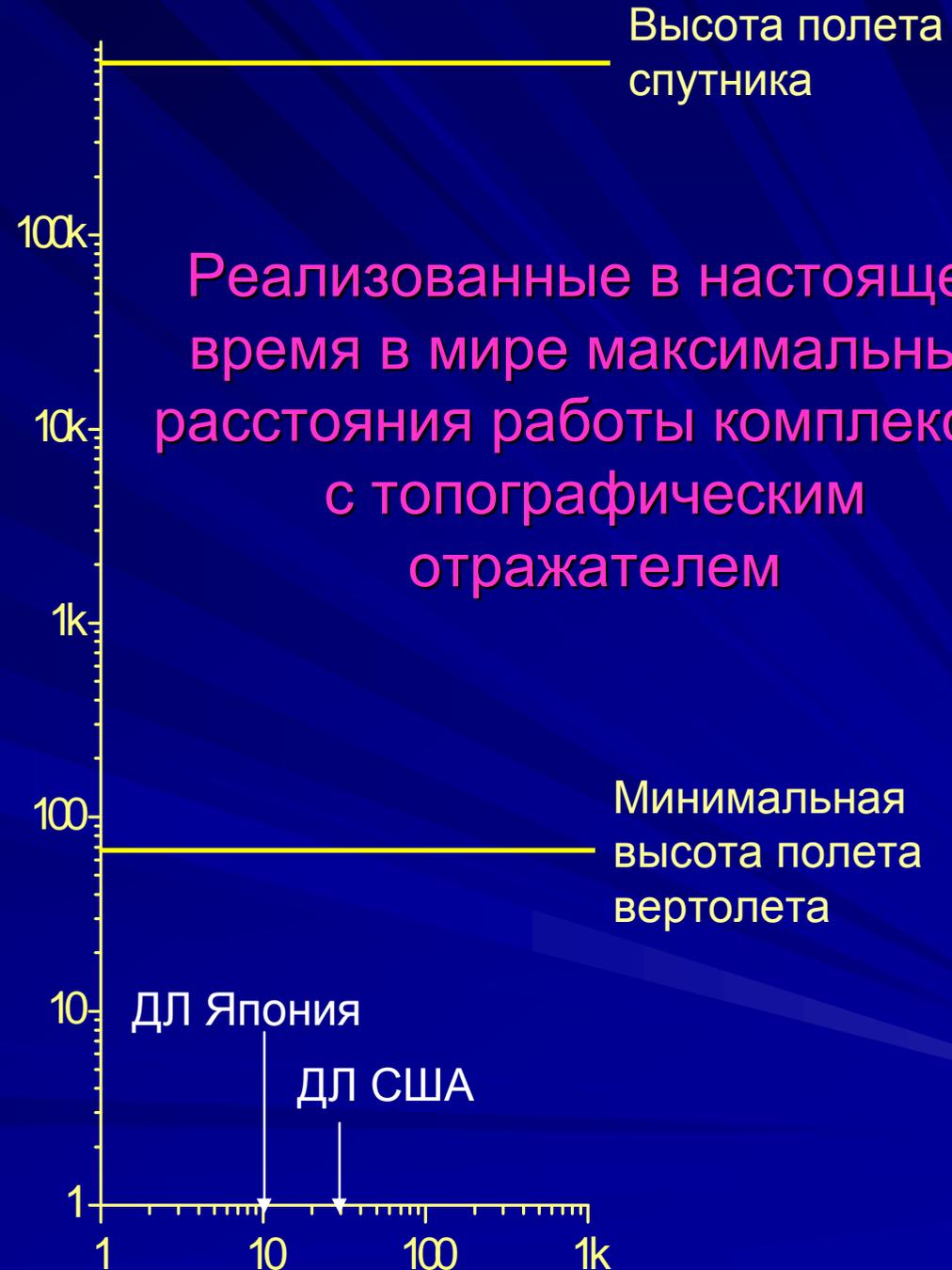
Детектирование утечки метана из газопровода низкого давления.

После обнаружения утечки вертолет совершил облет представляющего интерес участка.

Пример данных тестового полета, высота полета вертолета - 140 м.



Высота полета, м

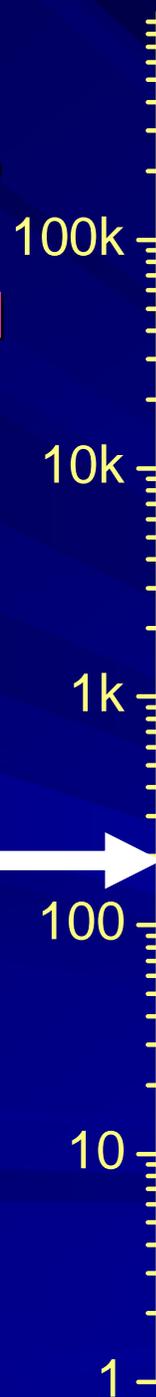


Реализованные в настоящее время в мире максимальные расстояния работы комплексов с топографическим отражателем

Комплекс вертолетного базирования, разработанный в ЦЕНИ ИОФАН



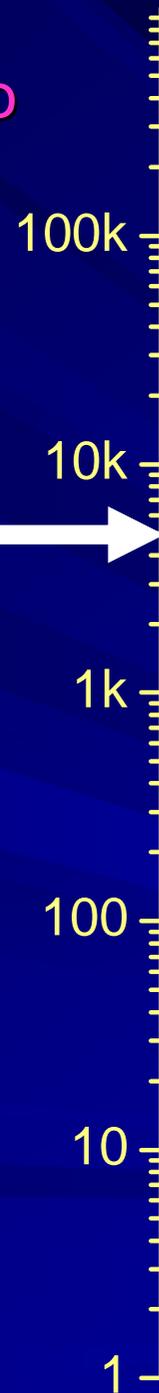
Тестовые полеты
2002-2003 годов



Высота полета
спутника

Минимальная
высота полета
вертолета

Комплекс самолетного базирования

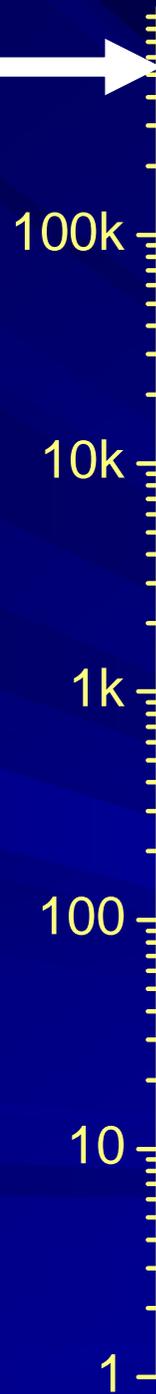


Параметры комплекса

P_0 , Вт	$0.002 \cdot 25$ дБ
D , см	20
f , см	200
d , см	0.5
$d\lambda$, МКМ	0.01



Комплекс спутникового
базирования

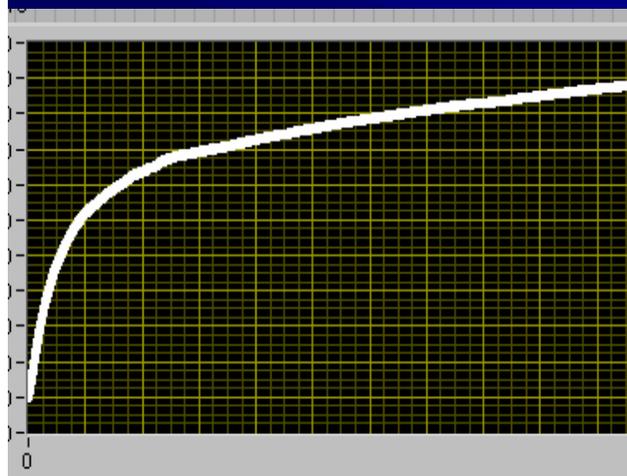
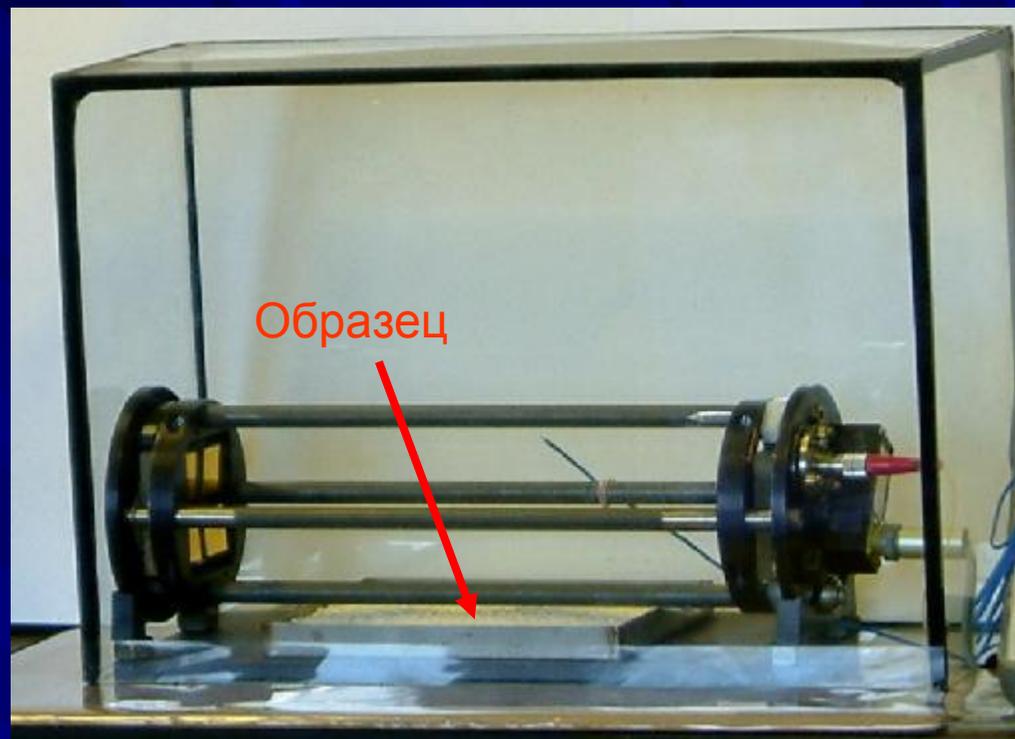


Параметры комплекса

P_0 , Вт	150
D , см	100
f , см	1000
d , см	1
$d\lambda$, мкм	0.001

Неконтактное детектирование взрывчатки

Внешний вид лабораторной
экспериментальной установки



Пример неконтактной регистрации образца (130 г) взрывчатки. Приведенный пример эквивалентен измерению 20 кг взрывчатки в проезжающем автомобиле. Уровень обнаружения в модельных условиях в настоящее время составляет около 100 г.

Мы это сделали!!!

ЦЕНИ ИОФАН

А.Г.Березин

И.Е.Вязов

В.Я.Заславский

Л.В.Медведев

Т.Ю.Москалев

Д.Ю.Наместников

Я.Я.Понуровский

С.Г.Рудов

Д.Б.Ставровский

С.М.Чернин

Ю.П.Шаповалов

РНЦ «КИ»

Г.Ю.Григорьев

С.М.Малюгин

Ш.Ш.Набиев

«Нолатех»

В.П.Дураев

ФТИ РАН

Ю.П.Яковлев,

И.С.Тарасов

«Полюс»

Г.А.Ермаков

В.Н.Курятов

ИОА СО РАН

В.А.Капитанов,

И.С.Тырышкин,

Н.П.Криволицкий,

Ю.Н.Пономарев

«Акила технолоджиз
груп» (США)

С.Каднер,

С.Краус,

М.Ондрик

Брюкхевенская
национальная
лаборатория
(США)

У.Рахаджи,

Джэй Джо

МАГАТЭ

Д.Ольсен,

В.Рыжиков,

Д.Бослер,

Дж.Танака