

На правах рукописи

Кузьмичев Александр Сергеевич

**Самолетный спектрометр на основе перестраиваемых диодных лазеров  
для измерения концентраций малых газовых примесей в тропосфере**

Специальность:

25.00.30 - метеорология, климатология, агрометеорология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Долгопрудный – 2013

Работа выполнена на базовом предприятии ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория» кафедры «Систем, устройств и методов геокосмической физики ФГАОУ ВПО «Московский физико-технический институт (государственный университет)».

<b>Научный руководитель:</b>	кандидат технических наук, директор ФГБУ «ЦАО», доцент Борисов Юрий Александрович
<b>Официальные оппоненты:</b>	доктор технических наук, главный научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения «Главная геофизическая обсерватория» им. А.И. Воейкова Синькевич Андрей Александрович  доктор физико-математических наук, профессор Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН), заведующий лабораторией морских течений Жмур Владимир Владимирович
<b>Ведущая организация</b>	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-производственное объединение «Тайфун»

Защита диссертации состоится «27» ноября 2013 г. в 11.00 на заседании диссертационного совета Д 327.005.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций в ФГБУ "ГГО" по адресу: 194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7

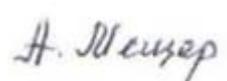
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного учреждения "Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова".

Автореферат разослан « 22 октября » 2013 г.

Ученый секретарь совета по защите

докторских и кандидатских диссертаций,

доктор географических наук



А.В. Мещерская

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Первой попыткой использования диодных лазеров для газового анализа атмосферы принято считать работу, опубликованную в 1974 году Хинкли. Впервые, отечественные работы по применению методов диодной лазерной спектроскопии для высокочувствительного газоанализа и исследования состава атмосферы проводились в 70-80 г. г. в Центральной Аэрологической Обсерватории. За прошедшие годы были разработаны и успешно апробированы методы диодной лазерной спектроскопии для контроля содержания окиси углерода, хлорфторуглеродов (ХФУ-11, ХФУ-12), метилхлороформа и ряда других примесей в атмосфере. Работы по этому направлению проводились ЦАО в содружестве с коллективами ученых Академии наук СССР. В упомянутых работах дается описание трассового газоанализатора окиси углерода на основе перестраиваемых по частоте полупроводниковых лазеров, современное название которых - диодные. Созданный в ходе совместных работ прибор являлся первым отечественным спектрометром для измерения концентраций угарного газа в оперативном режиме на основе перестраиваемых диодных лазеров.

Главным достоинством диодных лазеров (ДЛ) по сравнению с другими лазерными источниками излучения является возможность широкодиапазонной перестройки частоты излучения ДЛ простыми аппаратными средствами. Частоту излучения ДЛ можно изменять в достаточно широких пределах ( $\sim 100 \text{ см}^{-1}$ ) с помощью изменения рабочей температуры лазера. Важными преимуществами диодных лазеров в сравнении с другими типами лазеров являются: малые размеры, большой диапазон длин волн и относительно малая себестоимость. За счет узкой ширины линии генерации диодного лазера возможно сканирование слабых линий поглощения основных парниковых газов в большом (около  $10^4$ ) динамическом диапазоне. При работе в лаборатории, по величине коэффициента полезного действия и диапазону перестройки, с диодными лазерами могут сравниться лазеры на красителях, однако использование их в полевых условиях, в том числе на мобильных платформах крайне неудобно.

Развивая метод измерения концентраций малых газовых примесей в атмосфере, в том числе парниковых газов и их изотопов с помощью диодных лазеров с улучшенными качественными и количественными характеристиками, в данной работе был разработан метод и реализован экспериментальный образец спектрометра, предназначенного для использования на самолете-лаборатории. Создание самолета-лаборатории началось в 2009 году в

авиационном конструкторском бюро «Экспериментальный машиностроительный завод им. В.М. Мясищева» по заказу Росгидромета на базе пассажирского лайнера ЯК-42Д. В составе научного оборудования самолета-лаборатории имеется комплекс приборов для измерений газового и аэрозольного состава атмосферы. Одним из таких приборов является экспериментальный образец спектрометра на основе перестраиваемых диодных лазеров, разработанный в данной диссертационной работе. Спектрометр предназначен для систематических измерений в атмосфере фоновых концентраций метана, углекислого газа, водяного пара и его изотопов в реальном масштабе времени. В качестве источников излучения в спектрометре используются перестраиваемые диодные лазеры с распределенной обратной связью и волоконным выводом излучения, работающие в ближней ИК области. Выбор в качестве источников излучения диодных лазеров объясняется их простотой в эксплуатации, малыми размерами и долговечностью. Помимо этого, применяемые в спектрометре современные диодные лазеры, имеют узкую ширину линии генерации (2-3 МГц), обеспечивающую высокое разрешение при измерениях спектрального поглощения различных газов. Методы диодной лазерной спектроскопии, обладающие высоким разрешением и большим динамическим диапазоном измерений (от 1 до 15000 ppm), в настоящее время находят все большее применение в измерениях концентраций парниковых газов. Важным аспектом, который дает преимущество лазерным методам исследования парниковых газов, является то, что измерения с помощью диодных лазеров не требуют какой-либо предварительной подготовки образцов воздушных проб, позволяя проводить измерения оперативно, в режиме реального времени.

Необходимость создания современного самолетного лазерного спектрометра, обеспечивающего в реальном масштабе времени измерения содержания  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  в тропосфере на уровне фоновых концентраций газов определяет актуальность настоящей работы.

**Целью работы** является разработка и изготовление экспериментального образца спектрометра, предназначенного для установки на самолете-лаборатории в качестве штатной аппаратуры, изготовленного на основе диодных лазеров ближнего ИК-диапазона для измерения в реальном масштабе времени концентраций  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и их изотопов.

Для достижения цели работы необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Адаптировать метод диодной лазерной спектроскопии применительно к самолетным измерениям и обосновать его применение для определения концентраций метана, углекислого газа, водяного пара и его изотопов.
2. На основе моделирования спектров поглощения исследуемых газов определить минимальные уровни измеряемых концентраций, выбрать типы диодных лазеров, обосновать выбор спектральных аналитических линий и определить оптимальную схему измерений с борта самолета-лаборатории.
3. Разработать структурную схему спектрометра, определить основные технические характеристики элементов прибора.
4. Провести тестовые измерения концентраций парниковых газов в атмосфере в лабораторных и полевых условиях.
5. Провести тестовые измерения высотных профилей концентраций парниковых газов в ходе экспериментального полета самолета-лаборатории ЯК-42Д «Росгидромет».

#### **Научная новизна работы.**

1. Впервые, на основе метода диодной лазерной спектроскопии, разработан и изготовлен самолетный спектрометр, предназначенный для определения высотных профилей концентраций малых газовых примесей в атмосфере с борта исследовательского самолета-лаборатории.
2. Экспериментальный образец спектрометра установлен на борт самолета-лаборатории ЯК-42Д «Росгидромет» в качестве штатного средства измерений концентраций парниковых газов и их изотопов в атмосфере.
3. Разработан пакет программ обработки данных спектрометра для обеспечения оперативных самолетных наблюдений парниковых газов.
4. С помощью диодного лазерного спектрометра проведены экспериментальные исследования спектров поглощения водяного пара, позволившие уточнить значения интенсивности, полуширины и величины сдвига линий поглощения водяного пара относительно спектроскопической базы данных HITRAN в области длины волны 1.39 мкм.
5. В ходе тестовых испытаний самолета-лаборатории ЯК-42Д «Росгидромет» получены высотные профили концентраций метана и водяного пара на высотах полета до 9500 метров в атмосфере.

**Практическая ценность работы** заключается в том, что созданный образец спектрометра внедрен в качестве штатной аппаратуры в составе научного оборудования самолета-лаборатории ЯК-42Д «Росгидромет». Разработанная методика самолетных измерений парниковых газов в атмосфере с помощью спектрометра и разработанная техническая документация прибора являются частью руководства по эксплуатации научного оборудования самолета-лаборатории. Результаты диссертации могут быть полезны для оценки влияния выбросов парниковых газов на радиационный баланс в атмосфере. Для этой цели планируется применять разработанные метод и аппаратуру для измерений содержания парниковых газов и их изотопов в атмосфере с помощью различных мобильных платформ (самолет-лаборатория, аэростат, автомобиль и др.). Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке спектрометров на основе диодных лазеров для измерения концентраций других малых газовых составляющих атмосферы.

#### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты моделирования спектров поглощения парниковых газов, проведенного с целью выбора оптимальных условий для их измерения с борта самолета-лаборатории.
2. Метод измерений концентраций парниковых газов и их изотопов в реальном масштабе времени, реализованный с борта самолета с помощью спектрометра на основе перестраиваемых диодных лазеров в ближнем инфракрасном диапазоне.
3. Оценки значений минимально обнаружимых концентраций углекислого газа, метана, водяного пара и их изотопов в атмосфере с помощью диодного лазерного спектрометра.
4. Структурная схема самолетного спектрометра, в том числе система отбора воздушных проб, программа получения и обработки спектров.

#### **Использование результатов работы:**

1. С помощью изготовленного прибора были проведены тестовые измерения концентрации водяного пара в приземном слое атмосферы вблизи автотрасс в Москве и Московской области. Спектрометр был установлен на крыше движущегося легкового автомобиля.
2. Экспериментальный образец спектрометра использовался для измерений концентраций парниковых газов ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ) на различных высотах в

тропосфере при проведении летных испытаний самолета-лаборатории Як-42Д «Росгидромет».

**Достоверность** полученных в диссертации результатов исследований подтверждается сопоставлением результатов измерений с данными, полученными с помощью серийных аттестованных зарубежных газоанализаторов, в том числе самолетных, и калибровкой созданного спектрометра с помощью поверочных газовых смесей. Разработанный метод измерений малых газовых примесей в атмосфере обоснован теоретически с использованием современной базы спектроскопических данных и апробирован в тестовых измерениях концентраций парниковых газов в атмосфере.

### **Личный вклад автора.**

Автор принимал участие на всех этапах работы по созданию самолетного спектрометра, в том числе в постановке задачи, теоретическому обоснованию метода, разработке основных элементов конструкции спектрометра, в проведении наземных и летных испытаний спектрометра в составе самолета лаборатории Як-42Д «Росгидромет» и в интерпретации полученных результатов. Основные результаты диссертационной работы получены автором лично. Автором были проведены все расчеты, связанные с анализом используемых данных наблюдений и модельных результатов.

### **Апробация работы.**

Основные результаты диссертационной работы докладывались на международных и всероссийских научных конференциях, семинарах и симпозиумах, список которых приведен в конце автореферата. Изготовленный экспериментальный образец спектрометра прошел предполетную аттестацию, подтвердил основные технические характеристики в самолетных измерениях концентраций парниковых газов на различных высотах в тропосфере в рамках программы летных испытаний самолета-лаборатории Як-42Д «Росгидромет».

### **Публикации.**

По теме диссертационной работы опубликовано 18 работ, включая две статьи из перечня изданий, рекомендованных ВАК, 16 в докладах, опубликованных в трудах международных и всероссийских научных и технических конференций.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 91 наименования. Работа изложена на 138 страницах, содержит 63 рисунка, 11 таблиц, 7 приложений.

### **Краткое содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель работы и решаемые задачи, определена научная новизна и указана практическая ценность работы, дана краткая характеристика содержания работы по главам. Дана краткая историческая справка об изучении состава атмосферы с помощью самолетов-лабораторий.

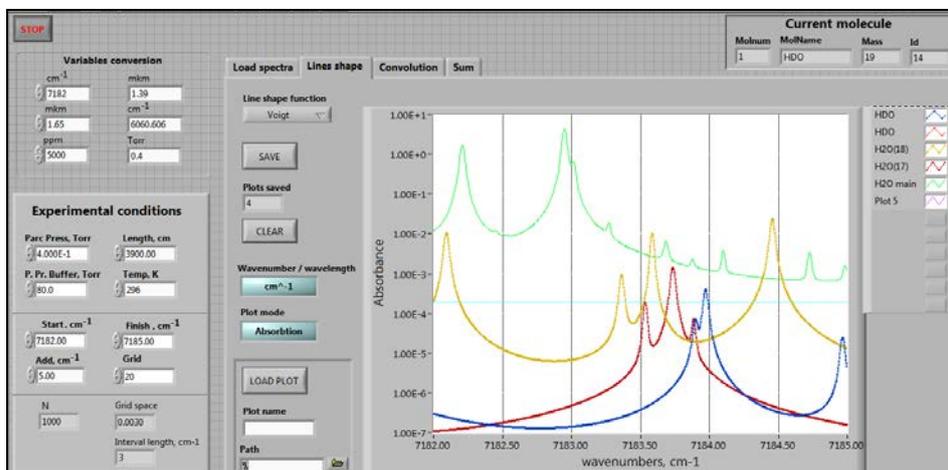
**В главе 1** дается краткое описание спектроскопических методов измерения концентраций парниковых газов, таких как спектрофотометрический, внутривибраторный, оптико-акустический и метод Фурье-спектроскопии. В этой главе обоснованы преимущества использования приборов на основе перестраиваемых диодных лазеров для задач атмосферного газоанализа. Рассмотрены возможности и перспективы использования диодных лазеров при измерениях на мобильных платформах, таких как аэростат, автомобиль, самолет-лаборатория. Сделан обзор научных работ отечественных и зарубежных специалистов по использованию методов диодной лазерной спектроскопии для измерения концентраций атмосферных газов с мобильных платформ.

**В главе 2** обосновывается выбор рабочих спектральных диапазонов для измерения метана, углекислого газа, водяного пара и его изотопов. Дается обоснование необходимости предварительного моделирования для выбора конкретных спектральных линий. Описывается методика измерения концентраций газов с использованием перестраиваемых диодных лазеров. Обосновывается выбор типов используемых лазеров, фотоприемников, излагаются принципы их работы. Приводятся расчетные формулы для определения концентраций парниковых газов в атмосфере, и анализируются шумовые характеристики спектрометра в зависимости от времени накопления сигнала.

В разделах 2.1 и 2.2 настоящей главы изложены физические основы получения модельных спектров поглощения основных парниковых газов в атмосфере. На базе пакета "LabView 8.6" и базы данных HITRAN-2008 реализована программа вычисления высотной зависимости оптической плотности, позволяющая проводить предварительный отбор аналитических спектральных линий газов из базы данных HITRAN. Кроме этого, в

разработанном автором интерфейсе, при получении модельного спектра предусмотрена возможность учитывать следующие параметры линий: сдвиг по частоте, полуширину на полувысоте, коэффициент сужения Дикке. Разработанная в диссертационной работе программа позволяет моделировать поведение аналитических линий в зависимости от буферного газа, давления и температуры. Для определения оптической плотности использовались следующие модельные профили спектральной линии: Фойгта, Раутиана-Собельмана, Галатри.

На рис.1, в качестве примера, представлен результат моделирования оптической плотности водяного пара естественного изотопного состава и его изотопов в диапазоне 1.39 мкм, в кювете длиной 39 м при давлении 100мБар и температуре 23°C.



**Рис. 1. Интерфейс программы моделирования оптических плотностей**

В результате предварительного моделирования оптических плотностей были выбраны следующие аналитической линии ближнего ИК-диапазона спектра: для  $\text{CO}_2$  -  $6248.5779 \text{ cm}^{-1}$  (1.60 мкм), для  $\text{CH}_4$  -  $6057.0861 \text{ cm}^{-1}$  (1.65 мкм). Для детектирования изотопов паров воды,  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ ,  $\text{H}_2^{17}\text{O}$ ,  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  и HDO используется диапазон  $7182\text{-}7185 \text{ cm}^{-1}$  (1.39 мкм). В качестве аналитических линий используются:  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  -  $7184.1109 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\text{H}_2^{17}\text{O}$  -  $7183.7354 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  -  $7184.4563 \text{ cm}^{-1}$ , HDO -  $7183.9727 \text{ cm}^{-1}$ .

На основе определения рабочих спектральных диапазонов, в разделах 2.3 и 2.4 описываются принципы выбора типов диодных лазеров и фотоприемников для построения спектрометра. В разделе 2.5 исследуются возможные типы шумов спектрометра, работающего в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн.

Для анализа предельной чувствительности спектрометра в соответствии с тенденцией, прослеживаемой в работах последний лет, использовался метод дисперсии Алана. Суть этого метода состоит в разбиении всех получаемых в эксперименте значений измеряемой величины на  $m$  равных подгрупп и анализе дисперсий для каждой подгруппы, причем  $m$  может варьироваться.

В разделе 2.7 описан принцип определения концентраций измеряемых парниковых газов. В процессе обработки полученного спектра, осуществлялась кросскорреляционная свертка  $C_{ab}$  аналитического спектра с базовым спектром. Вычисление концентрации  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  осуществлялось по формуле:

$$C = \frac{\alpha I_b}{l_a} \cdot 10^6 \quad (1)$$

где концентрация  $C$  выражается в ppm,  $l_a$ ,  $l_b$  – оптические длины реперной и аналитической кюветы,  $\alpha$  - коэффициент совпадения функций  $C_{ab}$  и  $C_{bb}$ , вычисляемый в ходе линейной подгонки  $C_{ab}$  по  $C_{bb}$ .

**В главе 3** описывается функциональная схема самолетного ДЛ-спектрометра, приводятся основные характеристики компонент спектрометра. Рассмотрены типы используемых лазеров, фотоприемников и принципы их работы. Описывается разработанная схема отбора проб атмосферного воздуха с борта самолета-лаборатории.

В разделе 3.1 изложена функциональная структурная схема спектрометра, представленная на рис. 2.

В разделах 3.2 и 3.3 дано описание блоков спектрометра и принципы взаимодействия между собой модулей прибора, каждый из которых измеряет концентрацию определённого типа парникового газа.

ДЛ-спектрометр состоит из трех функциональных модулей – модуль измерения водяного пара, модуль измерения метана и модуль измерения углекислого газа. Они размещаются в кюветном и блоке диодных лазеров прибора, устанавливаемых в стандартную телекоммуникационную стойку, которая закрепляется в носовой части самолета-лаборатории. На рис. 2 представлена функциональная структурная схема ДЛ-спектрометра, с указанием основных элементов. Основываясь на результатах предварительного моделирования и предложениях рынка лазерных диодов, в качестве источников излучения выбраны диодные лазеры ближнего ИК-диапазона спектра с распределенной обратной связью и волоконным выводом излучения.



**Рис. 2. Функциональная структурная схема ДЛ-спектрометра**

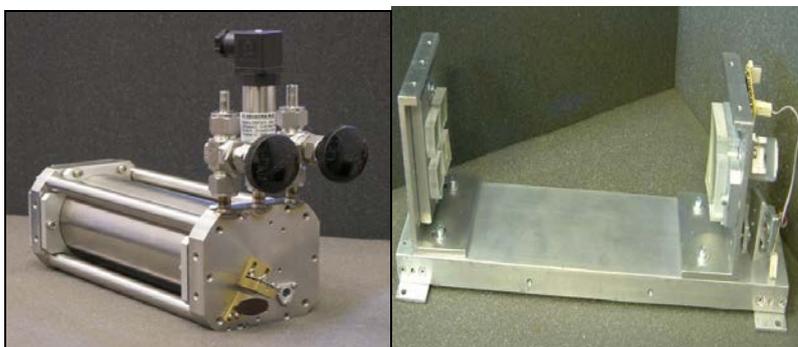
Модуль ДЛ-1 предназначен для измерения концентрации водяного пара и его изотопов. В качестве источника излучения использовался диодный лазер, генерирующий на длине волны 1.392 мкм. Мощность излучения лазера 20 мВт, ширина линии генерации 3 МГц. В качестве реперной кюветы для стабилизации по линии поглощения, в реперном канале этого модуля использовалась запаянная стеклянная ячейка, давление паров воды в которой составляло 9.3 мБар, при температуре 23°C. Детектирование излучения на выходе из реперного канала осуществлялось фотоприемником на основе германия, диаметром площадки 1.1 мм, обладающего обнаружительной способностью со значением  $D^*=3 \cdot 10^{12} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ .

Модуль ДЛ-2 спектрометра предназначен для измерения концентрации углекислого газа. В качестве источника излучения использовался диодный лазер, генерирующий на длине волны 1.602 мкм. Реперная кювета представляла собой стеклянную запаянную ячейку, наполненную газом  $\text{H}_2\text{S}$  при давлении 79.9 мБар, класс чистоты 99,9 %.

Модуль ДЛ-3 предназначен для измерения концентрации метана. В качестве источника излучения использовался диодный лазер, генерирующий на длине волны 1.650 мкм. Реперная кювета представляла собой запаянную стеклянную ячейку длиной 4 см, с давлением метана 106.6 мБар. Реперные

каналы использовались как каналы сравнения, а так же для дополнительной температурной стабилизации частоты лазерного излучения по линии поглощения реперного газа. В состав каждого модуля входят: диодный лазер (ДЛ) и обеспечивающая его функционирование электроника.

В состав блока диодных лазеров входят следующие платы: источника тока накачки ДЛ, питание температурного датчика ДЛ, управление элементом Пельте для диодного лазера, а так же питания предусилителей фотодиодов (ФД). В данном спектрометре используются диодные лазеры фирмы NEL с волоконным выводом излучения (АРС). С помощью Y-образного волоконного разветвителя часть излучения ДЛ направляется в реперный канал. В состав реперного канала входят кювета с калиброванной газовой смесью, а также ФД с предусилителем. Второй луч лазерного излучения после разветвителей каждого модуля с помощью объединителя направляется в выходное одномодовое волокно. Это волокно подсоединяется на вход многоходовой кюветы, изготовленной в Отделе диодной лазерной спектроскопии Института общей физики РАН по конструкции или по схеме С.М. Чернина, входящей в состав аналитического канала. Конструкция кюветы Чернина, использованная в составе ДЛС комплекса, приведена на рис.3. Базовая длина кюветы составляет 0.25 м, число проходов луча 156, оптическая длина пути, проходимого излучением составляет 39 м. Общий объем 2.5 литра. Излучение на выходе кюветы направляется на фотодетектор (ФД) аналитического канала спектрометра. Регистрация сигнала в реперных каналах модулей и в аналитическом канале проводится с помощью фотодетекторов. Реперные каналы используются как каналы сравнения концентраций, а также для дополнительной температурной стабилизации частоты излучения лазеров по линии поглощения реперного газа.



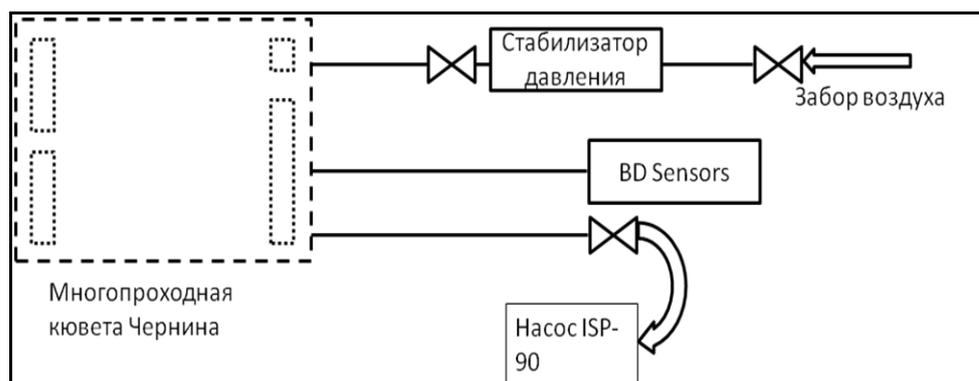
**Рис. 3. Многопроходная кювета системы Чернина**

Оптический блок предназначен для формирования и перераспределения перестраиваемого по частоте излучения диодных лазеров в каналах ДЛ-спектрометра. Эта возможность реализована с помощью элементов волоконной

оптики. Спектры излучения, детектируемые фотоприемником на выходе аналитического канала, используются для определения концентраций метана, углекислого газа и водяного пара в реальном масштабе времени. Электронный блок предназначен для управления током накачки диодного лазера, температурной стабилизацией лазерного кристалла, обработкой и выводом результатов измерений.

В разделе 3.4 представлены принципы электрического и вакуумного межблочного соединения блоков спектрометра. В разделе 3.5 описана схема расположения прибора на борту самолета-лаборатории Як-42Д «Росгидромет».

Подача заборного воздуха в спектрометр реализована с помощью разработанного модуля пробоподготовки, блок-схема которого представлена на рис.4. Насос ISP-90, обеспечивающий прокачку воздуха через аналитическую кювету, монтируется в переднем багажном отсеке самолета-лаборатории. Его включение обеспечивается с рабочего места оператора ДЛ-спектрометра непосредственно перед началом полета. От насоса в салон протягивается гофрированный шланг, стандарта KF-16, и посредством уплотняющего кольца и обжимки, сочленяется с выходным разъемом ДЛ-спектрометра. Входной разъем ДЛ-спектрометра оснащен печным фильтром, обеспечивающим снижение давления заборного воздуха и исполняющим функции защиты от пыли. Выходное отверстие спектрометра соединяется с гофрированной трубкой, изготовленной из нержавеющей стали, идущей к системе забора воздуха.



**Рис. 4. Блок- схема модуля отбора проб**

Давление воздуха, забираемого на входе в аналитическую кювету на низких высотах, дополнительно до 300 мБар редуцируется с помощью печного фильтра. Программируемый стабилизатор давления для EI-Press P602CV-350A осуществляет нормализацию давления воздуха до оптимального значения 25 мБар, которое было выбрано на основе предварительного моделирования.

Безмаслянный насос ISP-90 обеспечивает скорость потока 2 литра в секунду. Как показали пробные испытания соединительных конструкций, осуществляющих забор воздушных проб, температура воздуха на входе в аналитическую кювету, после преодоления им трубопровода равняется температуре окружающего воздуха в салоне самолета, поэтому не требуется дополнительный подогрев поступающих из-за борта воздушных масс. Аналитическая кювета укомплектована высокоточными датчиками температуры и давления газа, которые обеспечивают измерение этих величин в реальном масштабе времени. Для калибровки и дополнительной настройки аналитической кюветы предусматривается отключение забора воздуха. Это происходит путем перекрытия крана, расположенного около системы стабилизации воздуха.

В разделах 3.6-3.7 приводятся массогабаритные характеристики спектрометра и рассматриваются вопросы вибрационной устойчивости ДЛ спектрометра.

Для амортизации элементов спектрометра в условиях возможных вибраций, связанных с взлетом и посадкой самолета-лаборатории, каждый из блоков прибора демпфируется амортизаторами типа АПН с соответствующей номинальной нагрузкой. Фотография ДЛ-спектрометра со снятым внешним корпусом представлена на рис. 5.



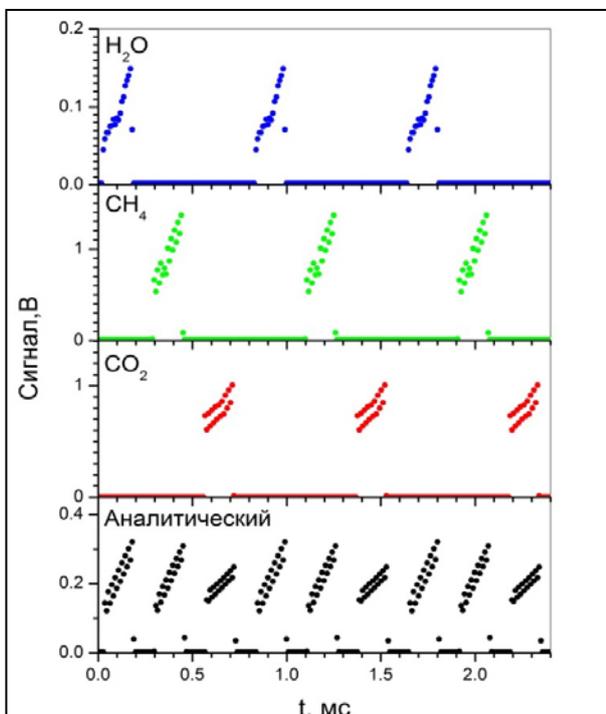
**Рис. 5. Внешний вид спектрометра**

Общий вес прибора составляет 40 килограмм. Ширина и глубина соответствуют стандартам 19" телекоммуникационной стойки. Высота электронного блока – 4U, высота оптического блока – 6U. Каждый блок имеет независимую амортизацию, с помощью демпферов типа АПН, обеспечивающих смягчение воздействий на компоненты прибора при штатных режимах посадки самолета-лаборатории.

В главе 4 дано описание программного обеспечения, разработанного для диодного лазерного спектрометра и схема функционирования трехканальной системы регистрации с временным мультиплексированием. Изложены принципы передачи данных от спектрометра на бортовой информационно-

вычислительный комплекс (БИВК) самолета-лаборатории Як-42Д «Росгидромет».

В разделах 4.1 и 4.2 описан алгоритм получения данных о концентрациях парниковых газов из спектров, записываемых ДЛ-спектрометром. Управление комплексом осуществляется с помощью станции NI-PXI-1031DC. Комплектация станции: Embedded Controller NI PXI-8186 и 3 Multifunctional Data Acquisition NI PXI-6289 модуля. Каждый модуль PXI-6289 состоит из двух каналов. Каждый канал имеет 2 DAC и 8 дифференциальных ADC. Сигналы реперных и аналитического каналов, а так же данные о температуре диодного лазера,



**Рис. 6. Импульсы тока накачки в каналах прибора.**

температуре и давления газовой смеси регистрируются с помощью ADC. Цифровой выход каждого канала осуществляет управление платой тока накачки, а также платой Пельтье. В изготовленной конфигурации самолетного спектрометра используются три канала станции, что обеспечивает возможность измерения концентраций трех парниковых газов в исследуемом атмосферном воздухе. Разработанное программное обеспечение позволяет стабилизировать температуру диодного лазера, перестраивать лазер по частоте, управлять током накачки, проводить сбор и обработку информации. На рис.6 продемонстрирована система временного мультиплексирования, используемая для определения концентраций парниковых газов. Изображены формы импульсов токов накачки используемых перестраиваемых диодных лазеров, одновременно для трех компонент спектрометра. Каждый диодный лазер спектрометра возбуждается периодическими трапециевидными импульсами тока накачки с модуляцией. В спектрометре использован режим временного мультиплексирования, т.е. токи накачки диодных лазеров сдвинуты по времени. Три верхних графика представляют собой сигналы фотодиодов с трех

реперных каналов. Нижний график представляет сигнал с фотодиода аналитического канала, который регистрирует излучение всех диодных лазеров.

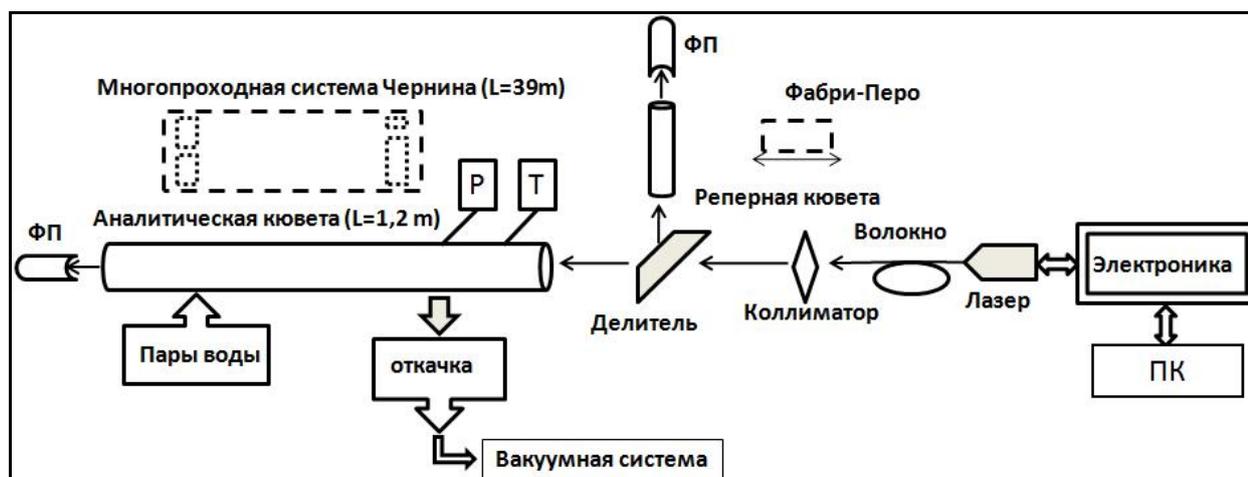
Запуск регистрации сигнала фотоприемником осуществляется триггером, принцип работы которого основан на использовании характеристической особенности в форме тока накачки лазера с модуляцией, генерируемой компьютером. Далее происходит регистрация сигналов импульсов реперного и аналитического каналов для каждого из лазеров и производится разложение общего массива данных с аналитического фотоприемника на подмассивы данных от каждого из диодных лазеров. После этого регистрируется сигнал, пропорциональный первой производной от формы линии поглощения и производится фильтрация сигнала с применением модельных корреляционных функций. Вычисление концентрации регистрируемого газа в аналитическом канале происходит только после стабилизации температуры ДЛ по линии поглощения. Важным преимуществом режима временного мультиплексирования является возможность определения концентрации каждого измеряемого газа независимо, в параллельном режиме программы обработки. Таким образом, использование режима временного мультиплексирования позволяет проводить одновременные измерения содержания нескольких газов (в существующей конфигурации до 6). При этом время одиночного измерения пропорционально числу измеряемых компонент.

В разделе 4.3 описываются принципы согласования протокола выходных данных с экспериментального образца диодного лазерного спектрометра и бортового информационного вычислительного комплекса, который создан для сбора и обработки выходных данных со всех аппаратно-программных комплексов, установленных на борт самолета-лаборатории Як-42Д «Росгидромет».

**В главе 5** представлены экспериментальные результаты наземных испытаний прибора, полученных при установке спектрометра на автомобиле и в лабораторных условиях. Приведены полученные в диссертационной работе уточненные экспериментальные данные по величинам интенсивностей спектральных линий, уширения и сдвига центров линий по частоте относительно известных ранее по спектроскопической базе HITRAN. Приведены полученные оценки быстродействия спектрометра и его чувствительность. Дано описание разработанных программ и методики сравнительных наземных испытаний спектрометра в составе аппаратно-программного комплекса самолета-лаборатории, отвечающего за измерения парниковых газов.

Ввиду того, что методики измерения метана и углекислого газа уже достаточно точно отработаны, основные экспериментальные задачи в ходе испытаний спектрометра были связаны с исследованием спектров поглощения водяного пара и определения на основе этой информации концентраций водяного пара и его изотопов.

На этапе лабораторных испытаний спектрометра, изложенных в разделе 5.1, для уточнения параметров аналитических линий, выбранных для измерения изотопов водяного пара с борта самолета-лаборатории, проводилась запись и обработка спектров поглощения. Измерения проводились в диапазоне 1.39 мкм в оптической кювете длиной 2 метра при пониженном давлении. Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 7. Излучение ДЛ, выходящее из оптического волокна лазера, направлялось в аналитический и реперный каналы через коллиматор и оптический делитель. Для контроля давления и температуры в кюветах использовались цифровые датчики. Датчики давления: Элемер (диапазон измерений 0-100 КПа, погрешность 0.2 %), Сенсор (диапазон измерений 0-100 мБар, погрешность 0.1 %). Датчик температуры NTS-Термистр, сопротивление 3 кОм, точность 0.5 %.

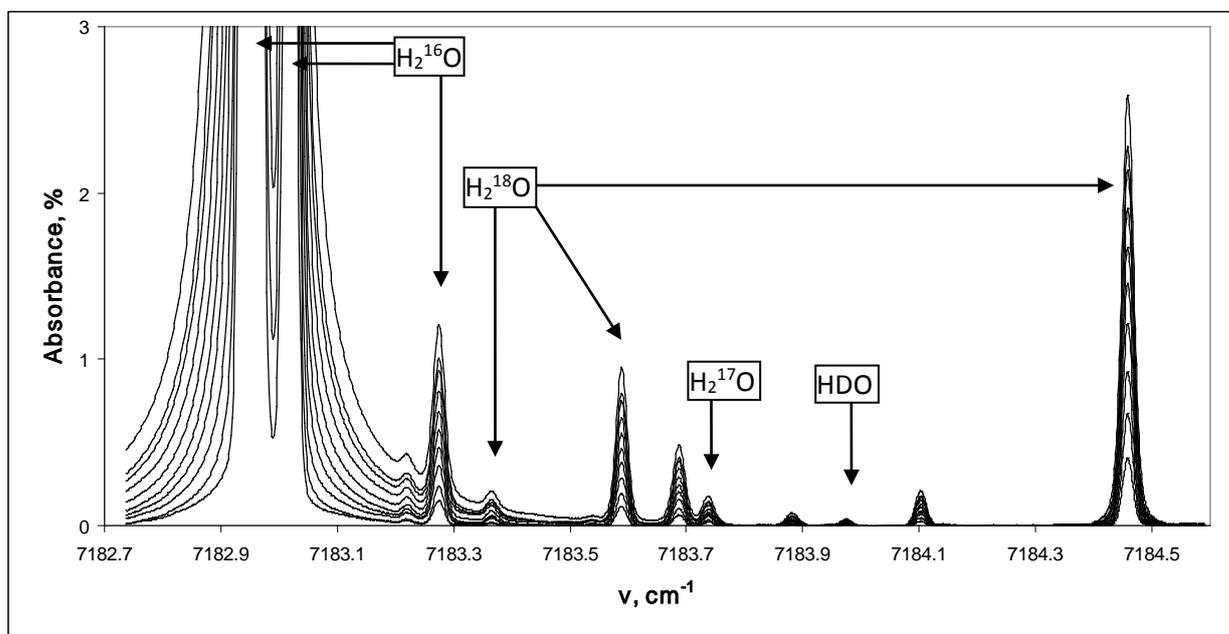


**Рис. 7. Блок-схема экспериментальной установки для уточнения параметров рабочих спектральных линий водяного пара**

На рис. 8. представлены спектры поглощения водяного пара в кювете длиной 2 метра при различных давлениях, полученные на изображенной выше установке. Диапазон изменения давлений в аналитической кювете от 0.7 до 13.3 мБар, температура 23<sup>0</sup> С. На основании этих данных были определены уточненные интегральные интенсивности линий изотопов водяного пара. На основе данных, представленных на рис. 8, можно определять изотопический состав различных проб водяного пара. Спектральный диапазон 7170–7190 см<sup>-1</sup> является оптимальным для анализа водяного пара методами диодной лазерной

спектроскопии, а область 7183.0–7184.6 см<sup>-1</sup> подходит для одновременного детектирования 4-х основных изотопных модификаций водяного пара. Точность измерения вертикального профиля концентраций водяного пара определяется ошибкой определения спектральных параметров, которая варьируется от 5% до 20%.

На втором этапе тестов, описанных в разделе 5.2, проводились натурные испытания прибора. Для этой цели экспериментальный макет лазерного спектрометра с открытым на атмосферу аналитическим каналом с оптической длиной 50 см, устанавливался на крыше автомобиля. Конструктивно аналитический канал был размещен на алюминиевой балке. Управление спектрометром осуществлялось оператором из салона автомобиля с помощью пакета управляющих программ на ноутбуке.

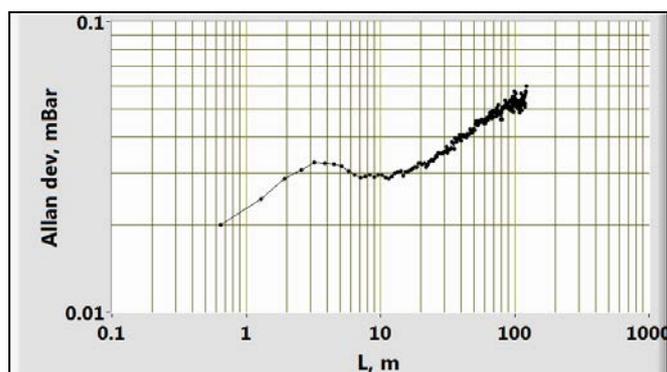


**Рис. 8. Экспериментальный спектр водяного пара в диапазоне 1.39 мкм**

В ходе тестовых измерений регистрировалась временная зависимость изменения концентрации водяного пара в приземном слое атмосферы при движении автомобиля по автотрассам в городе Москва и за её пределами в лесополосе. Одновременно с измерениями концентрации водяного пара с помощью системы GPS проводилась регистрация координат движущегося автомобиля. Полученные данные были проанализированы с помощью процедуры “Allan variance”. Пример такого измерения приведен на рис. 9.

Ранее проведенный анализ чувствительности системы при регистрации метана и углекислого газа, показал, что в приземном слое на высоте 1-2 километра, по метану он составляет 20 ppb, по углекислому газу - 20-30 ppm.

Чувствительность определения содержания основного изотопа воды,  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  - 100 ppm.

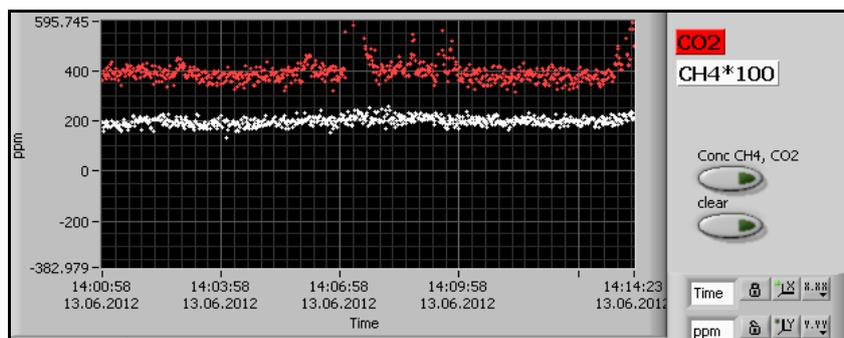


**Рис. 9. Зависимость отклонения Алана от длины усреднения - L**

Для больших длин усреднения виден дрейф, обусловленный крупномасштабной неоднородностью распределения водяного пара на трассе движения автомобиля. На графике наблюдается также размытый максимум длины усреднения в области 3-х метров, по-видимому, связанный со средним расстоянием между движущимися по трассе автомобилями.

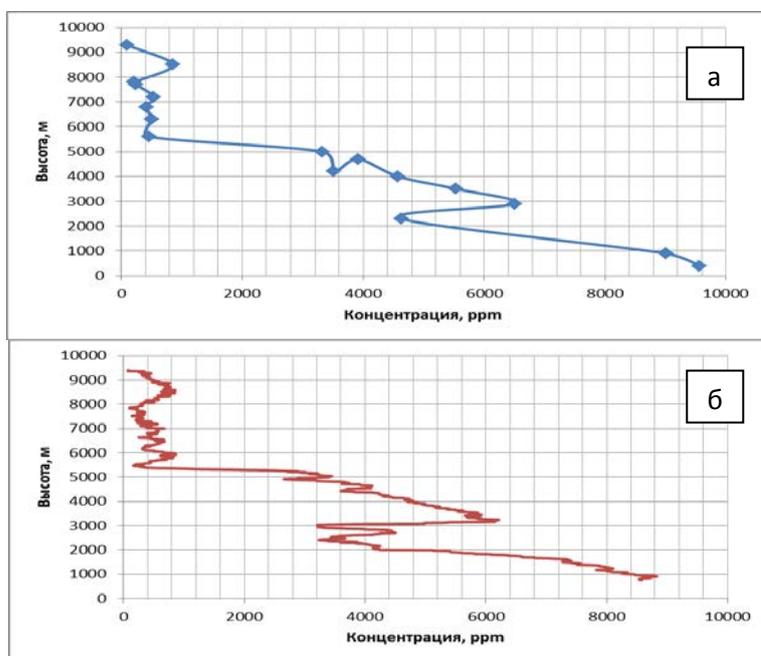
На третьем этапе натурных испытаний были выполнены работы по проверке соответствия параметров спектрометра обязательным требованиям ГОСТ Р 52931-2008, «Приборы контроля и регулирования технологических процессов. Общие технические условия». Эти испытания были проведены с участием автора в ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений».

На четвертом этапе тестов прибора проводилась калибровка экспериментального образца ДЛ-спектрометра в лабораторных условиях с помощью стандартов газовых смесей и прибора. Осуществлялась прокачка калибровочных смесей углекислого газа и метана через аналитическую кювету и сравнение данных о содержании этих газов в атмосфере с данными, полученными с других аттестованных газоанализаторов, имеющихся в распоряжении ФГБУ «ЦАО». На рис. 10 представлен пример сравнительных измерений метана и углекислого газа. Красным цветом указана концентрация углекислого газа в воздухе в лаборатории на территории ФГБУ «ЦАО», а белым, в увеличенном масштабе (умноженная для большей наглядности на 100), концентрация метана. Представлен 15-ти минутный фрагмент многочасовых измерений, частота единичного измерения – 5 секунд. Во время измерений в лаборатории были закрыты окна и не находились люди, поэтому скачков концентраций метана и углекислого газа не наблюдалось.



**Рис. 10. Пример измерений метана и углекислого газа**

На пятом этапе экспериментальных исследований проводилась установка разработанного образца спектрометра на борт самолета-лаборатории, подключение к системе воздухозабора и внутреннего питания самолета-лаборатории. Был создан канал связи для передачи выходной информации от спектрометра к бортовому информационно-вычислительному комплексу самолета-лаборатории Як-42Д «Росгидромет». После завершения этих работ, 31 июля 2013 года состоялся научно-испытательный полет самолета-лаборатории. Предварительные результаты измерений концентрации водяного пара с помощью спектрометра, представлены на рис.11а, результаты, полученные газоанализатором Picarro, представлены на рис. 11б:



**Рис. 11. Высотные профили концентрации водяного пара, измеренные ДЛ-спектрометром (синяя линия) и прибором Picarro (красная линия)**

Данные измерений концентраций метана, углекислого газа и водяного пара в ходе полета выводились на монитор, расположенный на рабочем столе оператора и записывались на жесткий диск внутреннего компьютера

спектрометра. Кроме того, в квазинепрерывном режиме с периодом 1 раз в 30 секунд осуществлялась передача данных о концентрациях парниковых газов на бортовой информационно-вычислительный комплекс в составе самолета-лаборатории. Передача массивов данных в непрерывном режиме на бортовой информационно-вычислительный комплекс самолета-лаборатории происходит по локальной сети, организованной на базе протокола ТСР/IP.

### **Основные результаты и выводы:**

В заключении перечислены основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Выбраны оптимальные рабочие спектральные диапазоны для измерения концентраций водяного пара и его изотопов, углекислого газа, метана.
2. С помощью диодного лазерного спектрометра проведены экспериментальные исследования спектров поглощения водяного пара, позволившие уточнить интенсивность, полуширину, сдвиг линий поглощения водяного пара по сравнению со спектроскопической базой данных HITRAN в области длины волны 1.39 мкм.
3. Обоснованы методики измерения концентраций парниковых газов и их изотопов в реальном масштабе времени.
4. Разработана принципиальная блок-схема экспериментального образца спектрометра на основе диодных лазеров для измерения парниковых газов.
5. Разработан и изготовлен экспериментальный образец самолетного спектрометра, предназначенный для определения высотных профилей концентраций малых газовых примесей в атмосфере с борта исследовательского самолета-лаборатории Як-42Д «Росгидромет».
6. Разработана программа управления диодным лазерным спектрометром и налажена передача данных о концентрациях парниковых газов в бортовой информационно-вычислительный комплекс самолета-лаборатории.
7. Согласована и реализована схема подключения ДЛ-спектрометра к электрической и вакуумной системам самолета-лаборатории.
8. На этапе летных испытаний спектрометра с борта самолета-лаборатории достигнуты следующие значения минимально обнаружимых концентраций основных парниковых газов в атмосфере: по метану - 20

ppb, по углекислому газу- 20-30 ppm, основному изотопу водяного пара  $H_2^{16}O$ - 100 ppm.

### **Публикации по теме диссертации**

#### **Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ:**

1. А.С. Кузьмичев, А.И. Надеждинский, Я.Я. Понуровский. "Измерение контуров линий поглощения паров изотопомеров воды в окрестности 1.39 мкм методами диодной лазерной спектроскопии", Квант. Электроника, 2011,41(7), 650–655.
2. A.I. Nadezhdinsky, Ya. Ya. Ponurovsky, Y. P. Shapovalov, I. P. Popov, D. B. Stavrovsky, V. U. Khattatov, V. V. Galaktionov , A. S. Kuzmichev Preliminary results of an aircraft system based on near-IR diode lasers for continuous measurements of the concentration of methane, carbon dioxide, water and its isotopes Appl. Phys. B (2012) 109 :505–510 DOI 10.1007/s00340-012-5226-z.

#### **Публикации в других изданиях:**

1. А.С. Кузьмичев. Моделирование спектров поглощения парниковых газов до высот 25 км от поверхности Земли. //Труды 53-й научной конференции МФТИ. Часть III. Аэрофизика и космические исследования. Т.2. - Москва: МФТИ, 2010, с. 92-93.
2. А.С. Кузьмичев, А.И. Надеждинский, Я.Я. Понуровский, В.У. Хаттатов. Моделирование спектров поглощения парниковых газов до высот 25 км от поверхности Земли. //Сборник трудов XXIV Съезда по спектроскопии Т.1.- Троицк: «Тривант», 2010, с.76-77.
3. А.С. Кузьмичев, В.У. Хаттатов, А.И. Надеждинский, Я.Я. Понуровский. Измерение контуров линий изотопомеров воды в диапазоне 1.39 мкм методами диодной лазерной спектроскопии.// Сборник трудов 14-го Общероссийского семинара по диодной лазерной спектроскопии, 2010,с.9.
4. А.С. Кузьмичев. Измерительный комплекс самолетного базирования на основе диодных лазеров ближнего ИК-диапазона для непрерывных измерений концентраций метана, углекислого газа, воды и её изотопомеров. //Труды 54-й научной конференции МФТИ. Аэрофизика и космические исследования. - Москва: МФТИ, 2011, с.36.

5. В.В. Галактионов, В.Я. Заславский, А.С. Кузьмичев, А.И. Надеждинский, Я.Я. Понуровский, И.П. Попов, Д.Б. Ставровский, В.У. Хаттатов, Ю.П. Шаповалов.// Измерительный комплекс самолетного базирования на основе диодных лазеров ближнего ИК-диапазона для непрерывных измерений концентраций метана, углекислого газа, воды и её изотопомеров Сборник трудов 16-го Общероссийского семинара по диодной лазерной спектроскопии,2011,с.12.
6. A.Kuzmichev, A. Nadezhdinskii, Ya. Ponurovskiy, D. Stavrovskii, I. Popov , I.Vyazov, Y. Shapovalov, V. Zaslavskii, V. Khattatov, V.Galaktionov Water channel of TDLS complex for the airplane-laboratory // ABSTRACTS OF PAPERS 8th International Conference on Tunable Diode Laser Spectroscopy. – Zermatt, Switzerland, 2011, p.28.
7. A. Kuzmichev, A. Nadezhdinskii, Ya. Ponurovskiy DL frequency accurate calibration.// ABSTRACTS OF PAPERS 8th International Conference on Tunable Diode Laser Spectroscopy. – Zermatt, Switzerland, 2011, p.27.
8. A. Kuzmichev, A. Nadezhdinskii, Ya. Ponurovskiy, I. Popov , Y. Shapovalov, V. Khattatov, V.Galaktionov. Atmospheric turbulence investigation using TDLS // ABSTRACTS OF PAPERS 8th International Conference on Tunable Diode Laser Spectroscopy. – Zermatt, Switzerland, 2011, p.40.
9. A. Kuzmichev, A. Nadezhdinskii, Ya. Ponurovskiy, V. Khattatov TDLS spectroscopy of water isotopomers near 1.39 mkm.// ABSTRACTS OF PAPERS 8th International Conference on Tunable Diode Laser Spectroscopy. – Zermatt, Switzerland, 2011, p.50.
10. A. Kuzmichev, Ya. Ponurovskiy, V. Khattatov Atmosphere constituents spectra modeling up to 25 km altitude. // ABSTRACTS OF PAPERS 8th International Conference on Tunable Diode Laser Spectroscopy. – Zermatt, Switzerland, 2011, p.51.
11. A. Kuzmichev, A. Nadezhdinskii, Ya. Ponurovskiy, Pressure broadening and shift of H<sub>2</sub>O line near 1.39 mkm. // ABSTRACTS OF PAPERS 8th International Conference on Tunable Diode Laser Spectroscopy. – Zermatt, Switzerland, 2011, p.62.
12. А.С. Кузьмичев, Ю.А. Борисов, В.У. Хаттатов, В.В. Галактионов, Я.Я. Понуровский. Моделирование спектров поглощения основных парниковых газов для задач аэромониторинга на высотах до 22 км. // Труды II Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-

- прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» т.2. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2012, с. 218-224.
13. A. Kuzmichev, A. Nadezhdinskii, Ya. Ponurovskiy, D. Stavrovskii, I. Popov, Y. Shapovalov, V. Zaslavskii, V. Khattatov, V. Galaktionov Tunable diode laser spectroscopy based complex for the airplane laboratory // Technical Programm, Laser Optics 2012 – p. 60.
14. A.S. Kuzmichev, V.U. Khattatov, V.V. Galaktionov, A. I. Nadezhdinskii, Ia.Ia. Ponurovskiy, D. B. Stavrovskii, I. P. Popov. Airborne gas analyzer of water vapor isotopomers on basis of near IR diode lasers.// XVII Symposium on High Resolution Molecular Spectroscopy HighRus-2012: Abstracts of Reports. - Tomsk: Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 2012, p.92
15. А.С. Кузьмичев, В.М. Семенов. Первые результаты тестовых измерений парниковых газов с помощью спектрометра на основе диодных лазеров ближнего ИК-диапазона. //Труды 55-й научной конференции МФТИ. Часть III. Аэрофизика и космические исследования. Т.1. - Москва: МФТИ, 2012, с. 29-30.
16. А. Kuzmichev, A. Nadezhdinskii, Ya. Ponurovskiy, V. Khattatov, V. Galaktionov, V. Semenov. Aircraft-Laboratory Yak-42D for Monitoring Gaseous and Aerosol Composition of the Atmosphere.//Abstracts of Papers MSARD-2013, Saint-Petersburg, Russia, 2013,p.114