

На правах рукописи

ВОРОНИНА Эллина Ивановна

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОЛЕКУЛ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ГАЗОВЫХ
СМЕСЯХ МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОГО ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ**

Специальность: 01.04.21 - ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

САНКТ - ПЕТЕРБУРГ

2005

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Привалов Вадим Евгеньевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Федорцов Александр Борисович

кандидат физико-математических наук Лукин Алексей Яковлевич

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет

Защита состоится «___» _____ 2006 года в ___ час. ___ мин на заседании диссертационного совета Д 212.229.01 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу 195251, С.-Петербург, Политехническая ул., 29 II учебный корпус, ауд. 470.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан «___» _____ 200 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.01,
доктор технических наук

Коротков А.С.

Общая характеристика работы

Настоящая работа, выполненная автором в 1996 - 2005 годах, посвящена исследованию методов лазерного дистанционного зондирования молекул в многокомпонентных газовых смесях и использованию этих методов для контроля параметров газовых смесей, как в различных технологиях, так и в охране окружающей среды. Проведены экспериментальные и теоретические исследования газовых молекул различных веществ, составляющих эти смеси, лидарами следующих типов: комбинационного рассеяния света, флуоресценции и дифференциального поглощения и рассеяния. Результаты работы позволили оценить предельные возможности исследуемых лидаров для зондирования газовых смесей в условиях рассеяния в свободной атмосфере и выбрать оптимальные варианты их реализации в промышленных условиях.

Актуальность темы. Многокомпонентные газовые смеси и потоки широко распространены в природе и играют важную роль во многих современных технологиях. Для исследований многокомпонентных газовых смесей и потоков наиболее перспективными сегодня представляются методы лазерного дистанционного зондирования, поскольку применение стандартных методов измерений параметров таких смесей оперативно и одновременно на больших расстояниях является проблематичным. В связи с этим необходима тщательная оценка потенциальных возможностей лидарных систем, диапазона их применения в дистанционном контроле конкретных газовых составляющих и степени влияния условий эксплуатации на режимы их работы.

Особая роль здесь отводится экспериментальным данным, использование которых становится основой для разработки специальных лидарных систем, а кроме того информация, полученная опытным путем, может быть использована в качестве исходных данных для дальнейших исследований параметров газовых смесей или для их более детального изучения.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований отдельных параметров газовых молекул, а также тщательные исследования регистрируемых лидаром сигналов позволяют найти оптимальный вариант технической реализации того или иного метода измерения параметров газовой смеси, содержащей эти

молекулы и, тем самым уменьшат погрешность измерений концентраций или повысят достоверность получаемых результатов при решении каждой конкретной задачи.

Цель работы. Общей целью настоящей работы являются теоретические и экспериментальные исследования лидарных методов измерения концентраций молекул в газовых смесях.

Для этого необходимо решение следующих задач:

-экспериментальные исследования параметров газовых молекул в измерительном объеме лидаром комбинационного рассеяния;

-проведение экспериментальных исследований параметров газовых молекул лидаром дифференциального поглощения и рассеяния;

-экспериментальные исследования молекул на флуоресцентном лидаре;

-численное моделирование лидарного уравнения для комбинационного рассеяния, флуоресценции и дифференциального поглощения и рассеяния для поиска оптимальной системы лазерного зондирования этих молекул;

-анализ полученных результатов и их оценка,

-анализ возможности применения лидара комбинационного рассеяния для экологического мониторинга на промышленном объекте.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1 Лазерные методы комбинационного рассеяния света, флуоресценции, дифференциального поглощения и рассеяния могут быть выбраны как оптимальные методы измерения концентрации молекулярных составляющих газовых смесей в атмосфере и воздушных потоках, благодаря своей высокой чувствительности и возможности работы в реальных промышленных условиях.

2 Для зондирования молекул газовых смесей необходимы знания дифференциальных сечений этих молекул. С этой целью проведены экспериментальные исследования на лабораторных лидарах комбинационного рассеяния света, дифференциального поглощения и рассеяния, флуоресценции.

3 На лидаре комбинационного рассеяния света проведены экспериментальные исследования зависимостей мощности комбинационного рассеяния чистого молекулярного водорода в направлении назад от расстояния зондирования и

вычислено значение дифференциального сечения комбинационного рассеяния молекул водорода. Используя это значение для определения концентрации молекулярного водорода в газовой смеси и в свободной атмосфере, выполнен анализ работы такого лидара в аналоговом режиме и режиме счета фотонов, на основании которого выбран оптимальный вариант зондирования молекулярного водорода лидаром комбинационного рассеяния света.

4 На флуоресцентном лидаре измерены зависимости интенсивности флуоресценции молекулярного йода в направлении назад от давления йода или его концентрации в заданном объеме. Определено значение дифференциального сечения флуоресценции молекул йода при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 532 нм, оценены возможности флуоресцентного лидара для измерений концентрации молекулярного йода при низких давлениях в атмосфере на заданных расстояниях от излучателя с достаточно высокой точностью и пространственным разрешением 200 м. Для обнаружения минимально возможной концентрации молекул йода в атмосфере на различных расстояниях зондирования и в различных экспериментальных условиях выполнены численные расчеты по лидарному уравнению для зондирования молекул йода на различных длинах волн лазерного излучения. Полученные результаты позволили сделать выбор оптимальной длины волны лазерного излучения для флуоресцентного зондирования молекулярного йода в атмосфере.

5 Экспериментальные исследования лидара дифференциального поглощения на молекулах йода позволили получить сечение поглощения молекулами йода на длине волны 532 нм. Полученные результаты могут быть использованы при дистанционных измерениях концентраций молекулярного йода и его изотопов в атмосфере. По результатам численных расчетов мощности сигнала дифференциального поглощения и рассеяния для зондирования молекулярного йода в атмосфере выбран оптимальный вариант зондирования лидаром дифференциального поглощения и рассеяния и оценены его возможности.

6 Результаты, полученные экспериментально и расчетным способом показали, что оснащение предприятий лидарными системами, позволяющими вести непрерывный дистанционный контроль атмосферного воздуха над промышленным

районом, обеспечит качество атмосферного воздуха, предотвратит возможные аварийные выбросы в атмосферу и улучшит, тем самым, экологическую обстановку.

Основные положения, выносимые на защиту.

На защиту выносятся следующие положения:

1 Измерено дифференциальное сечение комбинационного рассеяния для молекулы водорода на длине волны лазерного излучения 532 нм на лабораторном лидаре комбинационного рассеяния, значение которого является постоянной величиной для исследуемой молекулы на этой длине волны.

2 Измерено дифференциальное сечение флуоресценции для молекулы йода при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 532 нм на лабораторном флуоресцентном лидаре. Это значение дифференциального сечения флуоресценции является постоянной величиной для этой молекулы на длине волны 532 нм. Измерено сечение поглощения для молекулы йода на лабораторном лидаре дифференциального поглощения на длинах волн лазера 532 и 1064 нм, причем последняя использовалась в качестве опорной. Полученное значение сечения поглощения является постоянной величиной для этой молекулы на выбранных длинах волн.

3 Предложен вариант лидарной системы для экологического мониторинга на основании результатов выполненных экспериментов и численного решения лидарного уравнения для комбинационного рассеяния света, флуоресценции, дифференциального поглощения и рассеяния и реконструкции лидарных спектров комбинационного рассеяния исследуемых молекул.

Приоритет результатов. Основные результаты, по которым сформулированы научные положения, получены впервые.

Апробация результатов работы.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- Международном Аэрозольном Симпозиуме IAS-3 (Москва, 1996 г.);
- Научно-технической конференции «Лазерная технология и средства ее реализации-97» (Санкт-Петербург, 1997 г.);
- Конференции «Лазеры. Измерения. Информация» (Санкт-Петербург, 2000 – 2004 гг.);

- Конференции «Лазеры для медицины, биологии и экологии» (Санкт-Петербург, в 2000 - 2005 гг.);
- Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (Санкт-Петербург, Екатеринбург, Красноярск, Москва 2001 - 2004);
- Второй региональной научно-технической Конференции «Проблемы технической коммерческой эксплуатации транспорта» (Новороссийск, 14-16 июня, 2001 г.);
- Седьмой всероссийской научно-практической конференции «Техносферная безопасность» (Ростов-на-Дону, 2002 г.);
- Международных конференциях «Прикладная оптика» (Санкт-Петербург, в 2002, 2004 гг.);
- Международной конференции «Уравнения состояния вещества» (Кабардино-Балкария, Эльбрус, 2001 г.)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 работ, в том числе 8 статей, 10 докладов и тезисов на конференциях.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, и списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 138 страниц машинописного текста, в том числе 36 таблиц и 51 рисунок. Список литературы содержит 91 наименование.

Практическая значимость результатов.

Практическая значимость результатов состоит в следующем:

1 Проведенный анализ методов лазерного зондирования газовых смесей в воздушных потоках и атмосфере позволил определить потенциальные возможности лидаров комбинационного рассеяния света, флуоресцентного и дифференциального поглощения и рассеяния.

2 В результате экспериментальных исследований параметров газовых молекул с помощью методов комбинационного рассеяния света, флуоресценции и дифференциального поглощения и рассеяния получены соответственно дифференциальные сечения комбинационного рассеяния света, флуоресценции и поглощения этих молекул для измерения их концентраций в газовых смесях в атмосфере.

3 Численное моделирование лидарного уравнения для комбинационного рассеяния света, флуоресценции и дифференциального поглощения и рассеяния позволило определить оптимальные параметры лазерного излучения при зондировании исследуемых газовых смесей в атмосфере. Полученные результаты можно применять для решения задач, направленных на снижение уровня техногенного загрязнения атмосферного воздуха над промышленным районом:

- получение карт параметров рассеяния шлейфами выбросов и их эволюции во времени;

- контроль аварийных ситуаций;

- проведение исследований в области атмосферной оптики;

- контроль загрязнений.

4 Предложен вариант использования лидара комбинационного рассеяния света в системе мониторинга выбросов загрязняющих веществ на промышленном предприятии.

5 Предложена процедура численного моделирования лидара комбинационного рассеяния света для зондирования оксида углерода CO, диоксида серы SO₂, оксидов азота NO_x, углеводородов C_nH_m. Результаты моделирования являются исходными данными для разработки технических решений по построению лидарной системы, предназначенной для контроля загрязнений атмосферы данными веществами.

6 При интерпретации спектров комбинационного рассеяния света учтены физические причины, определяющие уширение, сдвиг спектральных линий, искажение их формы. Результаты реконструкции лидарного спектра комбинационного рассеяния молекул загрязняющих веществ позволят измерять интенсивность изолированных линий в спектре комбинационного рассеяния исследуемых молекул и определять концентрацию их в газовой смеси с более высокой точностью.

Основное содержание диссертации.

Во введении обоснована актуальность задачи, рассмотренной в диссертации, определены методы, подлежащие анализу, кратко изложено содержание диссертации и выдвинуты защищаемые положения.

В первой главе рассмотрены потенциальные возможности лидарных систем для зондирования молекулярного водорода и его изотопов в атмосфере методами комбинационного рассеяния света и дифференциального поглощения и рассеяния. Построен макет лидарной системы комбинационного рассеяния для экспериментального зондирования молекул водорода на трассе до 8 м. Выполнены измерения дифференциального сечения комбинационного рассеяния для исследуемой молекулы H_2 на длине волны лазерного излучения 532 нм. Полученное значение дифференциального сечения использовано для определения концентрации молекулярного водорода в атмосфере на заданных расстояниях от излучателя с достаточно высокой точностью и пространственным разрешением 7,5 м. Разработана процедура численного моделирования лидарного уравнения и рассмотрены значения его основных параметров. Выполнен учет фоновой засветки солнечным излучением при лидарном зондировании днем. Сделан выбор оптимальных длин волн лазерного излучения для измерения концентрации молекул H_2 в атмосфере и определены минимально детектируемые лидаром мощности сигнала комбинационного рассеяния на этих длинах волн в диапазоне расстояний от 0,1 до 6,0 км. Рассмотрен метод определения малых концентраций зондируемых газов в атмосфере лидаром комбинационного рассеяния, работающим в режиме счета отдельных фотонов. Показана эффективность регистрации лидарных сигналов таким способом

Рассмотрен метод дистанционного измерения концентрации молекул – дифференциальное поглощение и рассеяние. По результатам расчетов значений мощности лидарного сигнала сделан выбор оптимального варианта лидара дифференциального поглощения и рассеяния.

Вторая глава посвящена исследованию потенциальных возможностей лидарных систем для зондирования молекулярного йода и его изотопов в атмосфере методами флуоресценции, комбинационного рассеяния света и дифференциального поглощения и рассеяния.

Построен макет флуоресцентного лидара для экспериментального зондирования молекул йода на трассе до 8 м. Выполнены измерения дифференциального сечения флуоресценции для исследуемой молекулы I_2 на

длине волны лазерного излучения 532 нм. Полученное значение дифференциального сечения использовалось в расчетах для определения минимально обнаружимых концентраций молекулярного йода в атмосфере на заданных расстояниях от излучателя. Для измерения концентрации молекул I₂ и его изотопов в атмосфере флуоресцентным лидаром в различных условиях зондирования был проведен анализ режимов работы такого лидара с использованием различных типов лазеров. Разработана процедура численного моделирования лидарного уравнения для флуоресценции и рассмотрены значения его основных параметров. Учтено влияние фоновой засветки солнечным излучением при лидарном зондировании днем. Сделан выбор оптимальных длин волн лазерного излучения для измерения концентрации молекул I₂ в атмосфере и определены минимально детектируемые лидаром мощности сигнала флуоресценции на длине волны 589.5 нм в диапазоне расстояний от 0,5 до 10,0 км для этих длин волн. Выполнены численные расчеты значений мощности лидарного сигнала комбинационного рассеяния для различных экспериментальных ситуаций и концентрации йода. По результатам сделан выбор оптимального варианта лидара комбинационного рассеяния света для зондирования молекул I₂ в атмосфере. Построен макет лидара дифференциального поглощения, на котором проведены лабораторные исследования зависимости лидарного коэффициента дифференциального поглощения от парциального давления йода или его концентрации в специальной кювете. Получено значение дифференциального сечения поглощения молекул йода на длинах волн 532 и 1064 нм. Выполнены численные расчеты мощности лидарного сигнала дифференциального поглощения и рассеяния для различных экспериментальных ситуаций с использованием полученного значения сечения и концентраций йода в диапазоне 10⁵- 10¹⁴ см⁻³. По результатам оценены возможности лидара дифференциального поглощения и рассеяния для зондирования молекулярного йода в атмосфере.

В третьей главе сделана теоретическая оценка потенциальных возможностей лидара комбинационного рассеяния света для зондирования газовых молекул загрязняющих веществ в атмосфере над промышленным районом.

Рассмотрен вариант использования лидара комбинационного рассеяния света в системе мониторинга выбросов загрязняющих веществ на промышленном предприятии. Описаны принцип действия и режимы работы лазерной системы управления качеством атмосферного воздуха над промышленным районом. Рассмотрено лидарное уравнение для комбинационного рассеяния света и значения его основных параметров. Расчеты проведены для наиболее распространенных загрязняющих веществ в атмосферном воздухе: диоксида серы, оксидов азота, предельных, гетероциклических и серосодержащих углеводородов, а также сероводорода. Проведены сравнения полученных значений мощностей комбинационного рассеяния молекул и фоновых мощностей для выбранных длин волн излучений лазеров. Определены максимальные расстояния, на которых можно зарегистрировать молекулы этих веществ с заданной концентрацией в режиме однократного зондирования, и выбрана оптимальная длина волны излучения из пяти предложенных. Рассмотрен метод определения концентраций зондируемых газов в атмосфере лидаром комбинационного рассеяния, работающим в режиме счета отдельных фотонов. Выполнено численное моделирование лидарного уравнения комбинационного рассеяния для дневного вертикального зондирования из космоса в режиме счета фотонов молекул метана CH_4 , находящихся в приземном слое атмосферы и сделан выбор оптимальных длин волн лазерного излучения для измерения концентрации молекул CH_4 в атмосфере из космоса.

В четвертой главе проведены исследования трансформации спектра комбинационного рассеяния света на примере молекул метана CH_4 , его дейтерозамещенных аналогов CH_3D , CH_2D_2 , а также молекул пропана C_3H_8 и бутана C_4H_{10} с применением различных длин волн зондирующего лазерного излучения с увеличением расстояния в диапазоне зондирования 0,1 – 6,0 км. Выполнено численное моделирование спектров комбинационного рассеяния исследуемых газовых смесей различного состава. По результатам исследований трансформации спектров комбинационного рассеяния для рассмотренных газовых смесей получено, что уменьшение ослабления в атмосфере с ростом длины волны как лазерного излучения, так и излучения комбинационного рассеяния,

нелинейная спектральная чувствительность фотоприемника и влияние концентрации молекул в газовой смеси приводят к сложному перераспределению интенсивностей спектральных линий молекул в спектре комбинационного рассеяния таких смесей. Реконструированный лидарный спектр комбинационного рассеяния для конкретных параметров газовых смесей, выбранных длины волны лазера и типа спектрометра лидара позволяет оценить аналитические возможности такого лидара и сделать выбор полос комбинационного рассеяния молекул, по которым эти молекулы могут быть обнаружены в смеси и их концентрация получена из измеренного значения лидарного сигнала.

В заключении приводятся основные результаты работы.

Основные результаты и выводы.

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:

1 Изготовлен макет лидарной системы комбинационного рассеяния света для экспериментального зондирования молекул водорода на трассе до 8 м и выполнены измерения дифференциального сечения комбинационного рассеяния для исследуемой молекулы H_2 на длине волны лазерного излучения 532 нм.

2 Разработана процедура численного моделирования лидарного уравнения для комбинационного рассеяния света и рассмотрены значения основных параметров лазеров, атмосферы и молекул с учетом фоновой засветки солнечным излучением при лидарном зондировании днем.

3 Сделан выбор оптимальных длин волн лазерного излучения для измерения концентрации молекул H_2 в атмосфере и определены минимально детектируемые лидаром мощности сигнала комбинационного рассеяния на этих длинах волн в широком диапазоне расстояний зондирования. Показана эффективность метода определения малых концентраций молекулярного водорода в атмосфере лидаром комбинационного рассеяния света, работающим в режиме счета отдельных фотонов.

4 Выполнены численные расчеты значений мощности лидарного сигнала дифференциального поглощения и рассеяния для различных экспериментальных ситуаций и концентрации водорода, на основании которых сделан выбор оптимального варианта лидара дифференциального поглощения и рассеяния.

5 Изготовлен макет флуоресцентного лидара для экспериментального зондирования молекул йода на трассе до 8 м и выполнены измерения дифференциального сечения флуоресценции для исследуемой молекулы I_2 на длине волны лазерного излучения 532 нм.

6 По результатам численного моделирования лидарного уравнения для флуоресценции сделан выбор оптимальных длин волн лазерного излучения для измерения концентрации молекул I_2 в атмосфере и определены минимально детектируемые лидаром мощности сигнала флуоресценции на длине волны 589.5 нм в широком диапазоне расстояний.

7 Выполнены численные расчеты значений мощности лидарного КР сигнала для различных экспериментальных ситуаций и концентрации йода. По результатам сделан выбор оптимального варианта лидара комбинационного рассеяния для зондирования молекул I_2 в атмосфере.

8 Изготовлен макет лидара дифференциального поглощения, на котором проведены лабораторные исследования зависимости лидарного коэффициента дифференциального поглощения от концентрации йода в специальной кювете и получено значение дифференциального сечения поглощения молекул йода на длине волны 532 нм.

9 Выполнены численные расчеты мощности лидарного сигнала дифференциального поглощения и рассеяния для различных экспериментальных ситуаций с использованием полученного значения сечения в широком диапазоне концентраций молекул йода. По результатам оценены возможности лидара дифференциального поглощения и рассеяния для зондирования молекулярного йода в атмосфере.

10 Выполнено численное моделирование лидарного уравнения для комбинационного рассеяния для наиболее распространенных загрязняющих веществ в атмосферном воздухе: диоксида серы, оксидов азота, предельных, гетероциклических и серосодержащих углеводородов, а также сероводорода, находящихся в различных экспериментальных условиях. Рассмотрены варианты измерений различных концентраций зондируемых газов в атмосфере лидаром комбинационного рассеяния, работающим в режиме счета отдельных фотонов, в

том числе и для дневного вертикального зондирования из космоса в приземном слое атмосферы.

11 На основании полученных результатов предложено использование лидара комбинационного рассеяния в системе мониторинга выбросов загрязняющих веществ на промышленном предприятии и проанализированы возможности лазерной системы управления качеством атмосферного воздуха над промышленным районом.

12 Компьютерная реконструкция лидарного спектра комбинационного рассеяния для конкретных газовых смесей, выбранных длин волн лазера и типа спектрометра лидара позволяет предсказать аналитические возможности лидара комбинационного рассеяния и сделать выбор полос комбинационного рассеяния молекул, по интенсивности которых могут быть измерены их концентрации в смеси с заданной точностью.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1 **Воронина, Э.И.** Расчет параметров лазерного дистанционного зондирования молекулярного водорода [Текст] / Э.И. Воронина, В.Е. Привалов, В.Г. Шеманин // Научное приборостроение.-СПб., 1998.-Т.8, № 1-2.-С.68-70.

2 **Воронина, Э.И.** Лидарная система предупреждения выбросов углеводородов в атмосферу [Текст] / Э.И. Воронина, В.Г. Шеманин // Петербургская школа-семинар выставка “Лазеры в медицине, биологии и экологии”: сб. тр.-СПб., 1999.-С. 34.

3 **Воронина, Э.И.** Выбор частоты следования импульсов медного лазера для зондирования молекул загрязняющих веществ в атмосфере [Текст] / Э.И. Воронина, В.Г. Шеманин // Труды конференции “Лазеры. Измерения. Информация”.-СПб., 2000.-С.36-37.

4 **Воронина, Э.И.** Лидарная система управления качеством воздуха над промышленным районом [Текст] / Э.И. Воронина, В.Г. Шеманин // Труды конференции “Лазеры. Измерения. Информация”.- СПб., 2001.-С. 20-21.

5 **Воронина, Э.И.** Зондирование молекул загрязняющих веществ в атмосфере лидаром комбинационного рассеяния в режиме счета фотонов [Текст] / Э.И.

Воронина Э.И., В.Г. Шеманин // Труды конференции “Лазеры. Измерения. Информация”.-СПб., 2001.-С.21-22.

6 **Воронина, Э.И.** Лазерное зондирование молекул йода при низких давлениях [Текст] / Э.И. Воронина, В.Е. Привалов, В.Г. Шеманин // Труды конференции “Лазеры для медицины, биологии и экологии”.-СПб., 2001.-С. 35 – 36.

7 **Воронина, Э.И.** Зондирование молекул серосодержащих углеводов в атмосфере лидаром комбинационного рассеяния в режиме счета фотонов [Текст] / Э.И. Воронина, В.Е. Привалов, В.Г. Шеманин // Труды конференции “Лазеры для медицины, биологии и экологии”.-СПб., 2001.-С.37-38.

8 **Воронина, Э.И.** Зондирование молекул циклических углеводов в атмосфере лидаром комбинационного рассеяния в режиме счета фотонов [Текст] / Э.И. Воронина, В.Г. Шеманин // Труды конференции “Лазеры для медицины, биологии и экологии”.-СПб., 2001.-С.38-39.

9 **Воронина, Э.И.** Лазерное зондирование ароматических углеводов в атмосфере [Текст] / Э.И. Воронина // Сборник тезисов «ВНКСФ-7».-М., 2001.-С. 476 – 478.

10 **Воронина, Э.И.** Лидарное зондирование молекул йода при низких давлениях [Текст] / Э.И. Воронина, В.Е. Привалов, В.Г. Шеманин // Оптика и спектроскопия.-СПб., 2002.-Т. 93, № 4.-С.699-701.

11 **Privalov, V.E.** Lidar measurements of Iodine molecule concentration [Text] / V.E. Privalov, V.G. Shemanin, E.I. Voronina // Proceedings of SPIE.- Washington, 2002.-Vol. 4900.-P. 78-82.

12 **Воронина, Э.И.** Лидарная система управления качеством над промышленным районом [Текст] / Э.И. Воронина, В.Е. Привалов, В.Г. Шеманин // Экологические системы и приборы.-М., 2002.-№ 4.-С.13-15.

13 **Воронина, Э.И.** Реконструкция лидарного спектра комбинационного рассеяния смеси метана и его дейтерозамещенных аналогов [Текст] / Э.И. Воронина, Э.Н. Гришина, В.Г. Шеманин // Труды конференции “Лазеры. Измерения. Информация”.-СПб., 2002.-С.33-34.

14 **Воронина, Э.И.** Дифференциальное поглощение молекул йода на длинах волн YAG: Nd лазера [Текст] / Э.И. Воронина // Девятая Всероссийская научная

конференция студентов-физиков и молодых ученых «ВНКСФ-9»: сб.тр.: в 2 ч. - Екатеринбург-Красноярск, 2003.- Ч.2.-С.581-582.

15 Воронина, Э.И. Лидарная система определения аварийных выбросов углеводородов в атмосферу [Текст] / Э.И. Воронина, В.Е. Привалов, В.Г. Шеманин // Безопасность жизнедеятельности.-М., 2003.-№ 9.-С.30-33.

16 Воронина, Э.И. Система управления лидарной станцией мониторинга загрязнений атмосферы промышленного района [Текст] / Э.И. Воронина, Д.Ю. Сапожников, В.Г. Шеманин // Безопасность жизнедеятельности.-М., 2003.-№ 9.-С.34-37.

17 Воронина, Э.И. Зондирование молекул водорода на лабораторном лидаре КР [Текст] / Э.И. Воронина, В.Е. Привалов, В.Г. Шеманин // Письма в ЖТФ.-СПб., 2004.-Т.30, вып. 5.-С.14-17.

18 Grishina, E.N. Lidar Raman spectrum of the alkane molecules in gaseous phase transformation computer modeling [Text] / E.N. Grishina, V.G. Shemanin, E.I. Voronina // Proceedings of SPIE.- Washington, 2004.-V.5447.-P. 260 –267.