

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Проблема оперативного контроля параметров окружающей среды в наши дни является достаточно актуальной. Необходимость получения экспресс информации о температуре за окном, о влажности воздуха на улице в связи с опасностью возникновения гололедицы ощущают миллионы людей каждое утро. Другие виды параметров окружающей среды и атмосферы больше интересуют специалистов по экологии, метеорологии и безопасности; работников авиации, транспорта, военных, медиков, учёных и т.д., но степень их интереса и необходимый им объём информации поистине огромны.

Проблема сбора, обработки и хранения информации всегда волновала специалистов, обязанных решать конкретные хозяйственные или служебные задачи. Ещё совсем недавно данные метеорологических наблюдений сетевых метеостанций заносились в журнал на бумажный носитель и передавались в Гидрометцентр по радио с помощью азбуки Морзе, со скоростью несколько бит/сек. И это была огромная ежедневная, рутинная работа, отнимавшая много сил и времени. Информационно-коммуникационная революция, свидетелями которой мы являемся, перевернула все представления об объёмах хранения и скорости передачи информации. Сейчас практически каждый обладатель смартфона может принять или передать несколько Гбит информации со скоростью сотни Мбит/сек. При этом идёт бурное развитие гигантских информационных сетей, превращающихся постепенно в некую глобальную нейронную сеть. Понятно, что информационная революция вызвана огромным, постоянно растущим спросом на продукты информационных технологий, поддерживаемым миллиардными инвестициями.

Однако в системе глобальной информатизации есть слабое звено – это механизм сбора информации, ключевым элементом которого являются первичные сенсоры – источники исходных данных. Развитие этого сегмента информационной технологии продолжает сдерживаться сложностью физических и технических проблем, лежащих в основе этой области знания.

Например, совершенно очевидно, что при современном уровне развития вычислительной техники в условиях существования глобальных информационных систем прогноз погоды мог бы быть гораздо точнее, если бы массив исходных данных о температуре, давлении, влажности и скорости ветра был бы более полным. При этом речь идёт не об измерениях этих параметров в точке (или сети точек) на поверхности земли, а об оперативном получении информации о пространственно-временном распределении этих параметров атмосферы, по крайней мере, до высот 10–15 км. Именно

в этом слое атмосферы происходят основные процессы погодообразования. И для решения этой задачи уже не подходят системы локальных сенсоров, объединённых в разветвлённые сети. Здесь необходим принципиально иной подход, основанный на принципе дистанционных, пространственно разрешенных измерений.

Примером простейшего варианта системы дистанционного измерения является известный в метеорологии шар-зонд с контактным датчиком измерения температуры (заметим, что именно эти системы до сих пор стоят на вооружении метеорологических станций, причем не только нашей страны). Достаточно высокая стоимость зонда при необходимости проведения регулярных измерений делает такую систему слишком дорогой в эксплуатации, не позволяющей проводить наблюдения с необходимой частотой. Другим недостатком такой системы является непредсказуемый, стохастический характер траектории подъема зонда, затрудняющий процедуру интерпретации данных.

Существуют более тонкие варианты решения задачи измерения температуры, в которых атрибут дистанционности уже не связан просто с проведением многократных контактных точечных измерений, а является неотъемлемой принадлежностью метода. Системами, отвечающими такому критерию, являются лидары, чей принцип действия основан на анализе результата взаимодействия с веществом оптического излучения, распространяющегося вдоль трассы зондирования. Пространственное разрешение в лидарах, также как и в радиолокации осуществляется за счёт использования мощных световых импульсов.

Развивая и применяя лидарный подход, можно предложить методы дистанционного оперативного измерения различных характеристик атмосферы, построенные на использовании физических связей между параметрами среды и оптическими проявлениями взаимодействия излучения с веществом.

Именно задача поиска наилучшей связи между параметрами окружающей среды и характеристиками излучения является главной при разработке того или иного лидарного метода. При этом всегда неизбежно возникает и вопрос практической реализуемости физического принципа в измерительном устройстве. Разнообразные задачи дистанционной диагностики атмосферы требуют поиска специальных путей использования физического принципа и способов практической реализации метода. В каждом конкретном случае разработчику-исследователю приходится решать специальную задачу разработки аппаратуры и методики проведения измерений.

Однако, поскольку речь идёт о лидарных технологиях, основанных на использовании различных эффектов взаимодействия излучения с веществом, то здесь возможно осуществление некоторого единого подхода, связан-

ного со спектроскопическими проявлениями оптических взаимодействий. Особый интерес здесь вызывает некоторый класс оптических явлений, проявляющихся в возникновении излучения (эмиссии) в ответ на узкополосное воздействие лазерного импульса. Этот класс явлений отличается сложностью условий наблюдения, требующих применения тонких экспериментальных технологий, но при этом, как правило, оптический отклик несёт адекватную информацию об объекте взаимодействия и требуется минимум усилий по интерпретации данных зондирования. К таким явлениям, прежде всего, относятся явления спонтанного комбинационного рассеяния и флуоресценции и различные их модификации. Релеевское и Ми рассеяние также могут использоваться в спектроскопических лидарных технологиях как носители дополнительной информации.

В рамках предложенного подхода оказалось возможным объединить целое семейство лидарных методов дистанционной диагностики атмосферы, имеющих единую спектроскопическую основу и позволяющих решать широкий класс задач дистанционной диагностики состояния окружающей среды. Это задачи дистанционного определения вертикального распределения температуры и влажности атмосферы, необходимого для прогнозирования погоды и исследований в области физики атмосферы. Это и корректное измерение коэффициентов рассеяния по любому выбранному направлению, необходимое как для определения условий видимости в атмосфере, так и при проведении исследований в области физики аэрозолей. Большое значение имеет развитие дистанционных методов обеспечения безопасности. В последнее время эта проблема становится всё более актуальной в связи с распространением международного терроризма. Здесь спектроскопический подход позволяет осуществлять непрерывный дистанционный скрытный контроль состава воздуха и оперативно оповещать об опасности появления отравляющих веществ в атмосфере.

Особый интерес в последнее время вызывает проблема дистанционного обнаружения взрывчатых веществ и взрывных устройств. Здесь лидарный спектроскопический подход позволяет добиться чувствительности по парам тротила не хуже, чем чувствительность собачьего носа, осуществляя при этом дистанционный досмотр объекта на безопасном расстоянии.

Таким образом, применение единого подхода в рамках спектроскопической идеологии позволило найти общие решения для перечисленных выше задач развития лидарных методов диагностики атмосферы, применить общую техническую политику при разработке семейства лидарных систем, ведущую к получению практических результатов.

Целью диссертационной работы является разработка семейства методов и создание комплекса лидарных систем дистанционной лазерной диагностики состояния атмосферы на основе лидарных принципов с ис-

пользованием спектроскопических эффектов взаимодействия излучения с веществом.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Провести анализ информативной способности спектроскопических эффектов взаимодействия излучения с веществом с точки зрения эффективности их использования в лидарных технологиях.
2. Разработать метод дистанционного определения температуры атмосферы на основе использования чисто вращательных спектров спонтанного комбинационного рассеяния (СКР) на молекулах азота и кислорода.
3. Разработать метод дистанционного определения содержания водяного пара в атмосфере.
4. Разработать аппаратуру и методику дистанционного определения содержания жидкой воды в атмосфере.
5. Разработать метод дистанционного определения оптических характеристик атмосферы с помощью эффектов СКР и аэрозольного рассеяния.
6. Разработать высокочувствительный лидарный метод дистанционной диагностики молекулярных систем на основе использования эффекта СКР в «солнечно-слепой» области спектра.
7. Разработать лидарный метод обнаружения сверхнизких концентраций паров взрывчатых веществ на основе одночастотного лазерного фотолиза и лазерно-индуцированной флуоресценции NO-фрагментов.
8. Создать лабораторные макеты и опытный образец лидарных систем, реализующих перечисленные выше методы.
9. Осуществить экспериментальную апробацию методов и аппаратуры в природных условиях. Провести тестовые и калибровочные испытания.

Научная новизна работы

Впервые с помощью лидара, оснащённого многоканальной системой фоторегистрации с высоким временным разрешением, было получено пространственное распределение спектра СКР жидкой воды внутри облака.

Впервые для устранения геометрического фактора отношения лидарных сигналов разработан и применён двойной волоконный гомогенизатор распределения интенсивности с оптическим Фурье преобразованием.

Предложен и реализован практически способ определения аэрозольного коэффициента ослабления, использующий сумму лидарных сигналов, соответствующих двум участкам вращательного спектра СКР с противоположными зависимостями их интенсивностей от температуры, позволяющий исключить влияние температурной стратификации атмосферы на результаты измерений.

Предложена новая схема лазерно-локационного устройства для дистанционного определения оптических параметров аэрозолей с использо-

ванием эффекта СКР, где для разделения сигналов аэрозольного и комбинационного рассеяния служит интерферометр Фабри-Перо, применение которого позволяет повысить дальность и точность измерений при одновременном упрощении конструкции и уменьшении габаритов лидара.

Впервые для определения концентрации химических соединений в атмосфере методом СКР предложено использовать в качестве опорного сигнала первый обертона кислорода или азота.

Показано, что использование высокой плотности энергии зондирующего импульса эксимерного лазера на среде KrF приводит к снижению эффективности СКР-лидарного метода обнаружения паров химических веществ в атмосфере за счёт влияния эффектов фотофрагментации.

Экспериментально обоснована чувствительность панорамного СКР-лидарного газоанализатора в 2 ppm при обнаружении паров загрязняющих веществ в атмосфере с использованием многоканального матричного фотоприемника.

Предложена математическая модель каскадного процесса лазерного фотоллиза молекул взрывчатых веществ (ВВ) – лазерно-индуцированной флуоресценции продуктов фрагментации. Определён аналитический вид лидарного уравнения при возбуждении NO-фрагментов. Показано, что эффективность обнаружения для ступенчатого процесса возбуждения зависит от плотности энергии лазерного импульса. При этом оптимальное значение плотности энергии определяется сечением поглощения молекулы ВВ.

Обнаружено, что Q-ветви антистоксовых колебательно-вращательных спектров СКР на основных газовых компонентах атмосферы (N_2 и O_2) расположены в области полосы флуоресценции NO-фрагментов (236 нм) и являются источником помехи, снижающей чувствительность метода.

Показано, что при достаточной разрешающей способности аппаратуры спектральной селекции возможно абсолютное подавление помехи на 4 порядка при незначительных потерях сигнала.

Экспериментально доказана возможность использования метода обнаружения паров ВВ в атмосфере на основе одночастотного лазерного фотоллиза с последующим возбуждением NO-фрагментов из второго колебательного состояния на дистанциях более 10 м при чувствительности обнаружения 70 ppt (10^{-12} г/см³).

Впервые в задачах дистанционного обнаружения паров нитросоединений в атмосфере в качестве источника излучения был использован эксимерный лазер на среде KrF, генерирующий узкую линию (2 пм) на краю контура усиления.

Научная ценность

Выводы и опыт, полученные в результате теоретической проработки и экспериментальной апробации семейства методов на основе единого

спектроскопического подхода, являются уникальными и могут быть использованы при разработке лидарных систем различного назначения.

Предложен способ устранения систематической ошибки лидарных измерений температуры атмосферы, возникающей в нестационарных условиях формирования геометрической функции лидара.

Найдена оптимальная ширина аппаратного контура полихроматора канала водяного пара СКР-лидара, при которой можно пренебречь температурной зависимостью ширины и формы Q-ветви водяного пара.

Предложен метод и разработан алгоритм коррекции эффекта последствия фотодетекторов лидара для устранения ошибок определения параметров атмосферы из лидарных измерений.

Выявлены физические факторы, приводящие к снижению чувствительности СКР-лидарного метода при использовании источника излучения УФ диапазона длин волн, и предложены методы борьбы с ними.

На основе обобщённого подхода с использованием уравнения свёртки получено модифицированное уравнение лазерной локации для эффекта СКР в локальном объёме ограниченной протяжённости.

В ходе выполнения работы по разработке метода обнаружения паров ВВ определён вид лидарного уравнения, позволяющего рассчитывать величину лидарных сигналов, возникающих в процессе каскадного лазерного воздействия на молекулу ВВ и продукты её фотолиза.

Экспериментально доказана возможность обнаружения закладок взрывчатых веществ лидарным методом по наличию паров на дальности 13 м при температуре 23°C.

Практическая значимость определяется возможностью использования результатов данной работы при создании лидарных систем для мониторинга атмосферы и обеспечения безопасности.

Двойной монохроматор, разработанный для реализации лидарной технологии измерения температуры атмосферы на основе использования чисто вращательных спектров СКР на молекулах азота и кислорода, является базовым элементов многих лидарных систем измерения температуры, используемых в различных научных центрах России и мира (Германия, Швейцария, Голландия, Корея, Тайвань).

СКР-метеолидар для дистанционного определения вертикального распределения температуры и влажности атмосферы многие годы эксплуатируется в системе метеонаблюдений Швейцарской метеослужбы (г. Пайерн, Швейцария).

Разработан, изготовлен и прошёл государственные испытания опытный образец дистанционного обнаружителя паров взрывчатых веществ (ДОВВ-1).

Опытный образец был аттестован по чувствительности к парам тринитротолуола (ТНТ) силами специалистов ФКУ НПО «Специальная Техника и Связь» МВД России.

Опытный образец лидарного обнаружителя паров ВВ позволяет дистанционно (на расстоянии более 10 м) обнаруживать пары тротила и других ВВ на его основе.

Внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы апробированы и внедрены в Институте химико-энергетических технологий СО РАН, Федеральной службе безопасности России, в системе метеонаблюдений Швейцарской метеослужбы, в Институте Макса Планка по метеорологии, г. Гамбург, Германия. И могут быть использованы в системе «Росгидромета» и специальных подразделениях ФСБ и МВД России.

Методы исследования

В работе применен комплексный подход: используется теория рассеяния Рэлея, рассеяния Ми, теория спонтанного комбинационного рассеяния, теория дифракции, физическое и численное моделирование, методы математической статистики, натурный эксперимент. При выполнении работ по разработке аппаратуры широко использовались системы автоматизированного проектирования «SolidWorks» и «Zemax».

Положения, выносимые на защиту

1. Систематическая ошибка лидарных измерений температуры атмосферы в ближней зоне обусловлена неоднородностью процесса формирования геометрической функции СКР-лидара в спектральных каналах. Гомогенизация структуры оптических сигналов за счёт двойного перемешивания лучей в отрезках моноволоконного световода до и после оптического Фурье преобразования позволяет полностью исключить влияние геометрического фактора лидара на результаты измерения температуры.

2. Наблюдаемое в натурном эксперименте нарушение соотношения интенсивностей полос пространственно разрешенного колебательно-вращательного спектра СКР воды в нижней кромке облака связано с присутствием в облаке молекулярных комплексов воды – водяных кластеров. При этом их концентрация оказывается сравнимой с концентрацией молекул жидкой воды в облаке. Предполагаемое присутствие водяных кластеров затрудняет интерпретацию результатов зондирования и усложняет методику дистанционного определения содержания жидкой воды в атмосфере.

3. Использование суммы лидарных сигналов, соответствующих двум участкам чисто вращательного спектра СКР с противоположными температурными зависимостями их интенсивностей, позволяет исключить влияние

температурной стратификации атмосферы на точность определения аэрозольного коэффициента ослабления.

4. Для достижения предельной чувствительности СКР-лидарного газоанализатора необходимо не только подавить линию несмещённого рассеяния, но и обеспечить селективное подавление основных полос спектров СКР на молекулах азота и кислорода. Для нормировки сигналов вместо основных полос предлагается использовать их первые обертоны при условии коррекции спектральной зависимости их сечений.

5. При обнаружении паров ВВ на основе ЛФ/ЛИФ метода максимальная эффективность процесса достигается при использовании оптимальной плотности энергии зондирующего излучения. При длительности импульса 20 нс для паров тротила она составляет 210 мДж/см², а для паров гексогена – 240 мДж/см². Значение оптимальной плотности энергии определяется сечением поглощения паров ВВ на длине волны зондирующего излучения.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов исследования обеспечивается математической корректностью постановки задач, обоснованным применением аналитических методов расчёта, теоретическим подтверждением полученных результатов и выводов. Гарантируется общим согласием с физическими представлениями о распространении оптического излучения в атмосфере, а также согласованностью экспериментальных данных, полученных автором с данными, имеющимися в работах других авторов.

Апробация результатов исследования

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: 39th International Annual Conference “Energetic materials – Characterisation, Modelling and Validation” (Германия, 2008); Fraunhofer Symposium Future Security, 3rd Security Research Conference (Германия, 2008); XV International Symposium “Atmospheric And Ocean Optics. Atmospheric Physics” (Красноярск, 2008); Eighth International Symposium on Special Topics in Chemical Propulsion “Advancements in energetic materials & chemical propulsion” (ЮАР, 2009); 40th International Annual Conference of ICT “Energetic materials – Characterisation, Modelling and Validation” (Германия, 2009); V International Workshop HEMs-2010 “High Energy Materials: Demilitarization, Antiterrorism And Civil Applications” (Бийск, 2010); 25th International Laser Radar Conference (Санкт-Петербург, 2010); 3-й Международной научно-практической конференции Актуальные проблемы радиофизики «АПР-2010» (Томск, 2010); 1st EU Conference on the Detection of Explosives (Франция, 2011); XVII Международном симпозиуме “Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы” (Томск, 2011); 8th International High Energy Materials Conference & Exhibit (Индия, 2011); 26th International Laser Radar Conference (Греция, 2012); XVIII Международном симпозиуме

«Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Иркутск, 2012); V Всероссийской конференции молодых ученых «Материаловедение, технологии и экология в 3-м тысячелетии» (Томск, 2012); 4-ой Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск, 2012); 2nd European Conference on Detection of Explosives (Италия, 2013); 44th International Annual Conference of the Fraunhofer ITC (Германия, 2013); 9 th International Workshop High Energy Materials (HEMs) Workshop "Civil and Green Applications of High Energy Materials" (Япония, 2013); XIX Международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Барнаул, 2013); 5-й Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск, 2013); XX Международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Томск, 2014); Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Актуальные вопросы развития систем и средств ВКО» (Московская обл., 2014); X юбилейном международном форуме «Оптические системы и технологии OPTICS-EXPO 2014» (Москва, 2014).

Публикации

Основное содержание работы опубликовано в научной печати, в том числе в 24 статьях в научных журналах, включенных в перечень ВАК. Материалы диссертации вошли в 1 зарубежную и 1 российскую монографию. По теме диссертации получено 6 патентов на полезную модель.

Личный вклад автора

Диссертация представляет собой обобщение результатов многолетнего труда по разработке и реализации методов лазерного зондирования атмосферы. Выполнение этой сложной и многоплановой работы было бы невозможно без тесного и разностороннего сотрудничества с многочисленными коллегами. Персональный вклад автора заключается в постановке задач, разработке аппаратуры, планировании численных и натуральных экспериментов, в проведении лабораторных экспериментов, обработке полученных экспериментальных данных, анализе и систематизации полученных данных, представлении результатов работы научной общественности. При непосредственном участии автора проходили подготовка и проведение тестовых и государственных испытаний. Основными сотрудниками по совместной исследовательской работе и соавторами публикаций в различное время являлись Аршинов Ю.Ф., Сериков И.Б., Надеев А.И., Горлов Е.В., Жарков В.И., Панченко Ю.Н. В отдельных случаях были соавторы из других организаций, в т.ч. зарубежные.

Соответствие Паспорту специальности

Содержание диссертации соответствует пункту 4 «Квантовая природа света. Спонтанные и вынужденные процессы. Статистика фотонов. Оптические методы передачи и обработки информации, физические основы

квантовых вычислений» и пункту 5 «Люминесценция. Излучение и поглощение света изолированными и взаимодействующими атомами и молекулами. Источники света. Физические основы методов и техники спектроскопии. Лазерная спектроскопия, оптические прецизионные измерения и стандарты, спектроскопия одиночных атомов» паспорта специальности 01.04.05 Оптика.

Связь работы с научными программами, темами

Работа выполнялась в рамках государственных заданий по программам и хоздоговорам: программа фундаментальных исследований РАН 2008–2012 г. НИР «Развитие лидарных методов изучения атмосферы и подстилающей поверхности» Рег. №0120.0406.058; х/д «Шток», «Лидар-Т»; Заказные интеграционные проекты СО РАН №5 и №9; ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы». Тема НИР: «Развитие технологий дистанционного лазерного мониторинга и проведение комплексных исследований оптического, термического и метеорологического состояния атмосферы Земли (0–100 км) с использованием уникальной установки на базе двухметрового приемного зеркала Сибирской лидарной станции», ГК16.518.11.7067, 2011–2012 г.; Грант РФФИ №10-08-00347 «Развитие фундаментальных основ, технологий и систем многоволнового лазерного зондирования для мониторинга оптико-физических и метеорологических параметров атмосферы», 2010–2012; Грант РФФИ №11-08-10000 «Организация и проведение комплексной экспедиции по исследованию оптических параметров тропосферы в различных регионах Сибири с использованием средств локального контроля и дистанционного зондирования», 2011–2012. Грант РФФИ №11-08-98021 «Разработка высокоэффективного узкополосного УФ-излучателя для лидарного комплекса по дистанционному обнаружению паров азотсодержащих веществ в атмосфере», 2011–2012.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 408 страницах, содержит 44 таблицы и 200 рисунков. Список литературы включает 379 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, изложены новые научные результаты и положения, выносимые на защиту.

В первой главе дана общая характеристика спектроскопических эффектов взаимодействия излучения с веществом как информационной основы оптических методов дистанционного контроля состояния окружающей среды. Изложены общие принципы дистанционного определения параметров атмосферы на основе анализа оптических спектров лидарного отклика. Сформулировано спектральное представление лидарного уравнения. Проанализирована связь спектральных компонентов лидарного сигнала с параметрами атмосферы. Рассмотрены спектральный принцип разделения компонентов лидарного отклика и проблема доопределения лидарного уравнения. Систематизированы наиболее актуальные эффекты взаимодействия излучения с веществом и проведён анализ их информативной способности. Дана общая характеристика эффектов взаимодействия излучения с веществом с точки зрения целесообразности их использования в лидарных технологиях. Сделаны оценки спектроскопических характеристик лидарных откликов и сформулированы общие требования к аппаратуре спектральной селекции лидарных систем. Определена спектральная область возбуждения и эмиссии лидарных откликов. Сделана оценка интенсивности оптических сигналов и определён их динамический диапазон. Определены требования к разрешающей способности спектральной аппаратуры.

Во второй главе рассматриваются вопросы общих принципов применения эффекта комбинационного рассеяния для построения аппаратуры и методики лидарных измерений температуры атмосферы. Рассмотрены вопросы оптимального выбора положения и ширины температурно-чувствительных участков чисто вращательных спектров комбинационного рассеяния применительно к методике лидарных измерений температуры атмосферы. Дано краткое описание эффекта вращательного комбинационного рассеяния в терминах формы огибающей спектров, интенсивности линий, их относительного положения на оси частот. Разработана и описана методика измерений. Представлено решение задачи выбора оптимальных участков спектра для случая отсутствия оптических помех при проведении измерений, когда единственным источником ошибок является статистика фотоотсчётов самого отклика рассеяния. Исследовано влияние помехи несмещенного рассеяния и, соответственно, оценён необходимый уровень подавления этой помехи. Проведён анализ влияния шумов фона дневного неба на точность измерений. Приводится решение задачи выбора положения и ширины температурно-чувствительных участков спектра при конечном значении отношения сигнал-фон. Рассмотрены вопросы применения лидарной методики и представлены примеры калибровки температурного СКР-лидара.

Приводятся данные сравнительных испытаний по результатам синхронных измерений вертикального распределения температуры лидаром и радиозондовыми контактными сенсорами.

Основой идеи измерения температуры атмосферы по вращательным спектрам комбинационного рассеяния атмосферных молекул является использование температурной зависимости отношения интенсивностей оптимальной комбинации температурно-чувствительных линий вращательного спектра. Для простоты изложения проиллюстрируем суть подхода на примере вращательного спектра комбинационного рассеяния на молекулах азота.

В процессе практической реализации метода дистанционного определения температуры атмосферы возникает множество технических и методических задач, без решения которых невозможно создание прибора и проведение измерений, хотя все основные принципы построения лидаров остаются в силе.

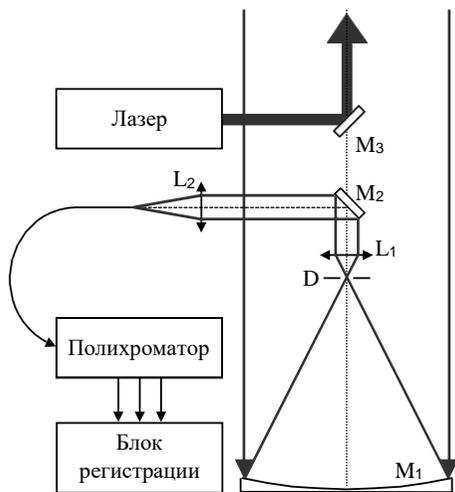


Рисунок 1 – Принципиальная схема лидара: M_1 – зеркало премного телескопа; M_2 и M_3 – поворотные зеркала; D – диафрагма, задающая поле зрения телескопа; L_1 и L_2 – согласующие линзы

сеяния и подавления помехи несмещённого рассеяния. Выделенные спектрально оптические сигналы СКР поступают на блок фотодетекторов для фотодетектирования и регистрации.

При регистрации отклика рассеяния в режиме счета фотонов в случае отдельной линии чисто вращательного спектра СКР на молекулах азота или кислорода можно записать выражение для числа фотоотчетов, обусловленных фотонами, пришедшими на вход системы фотодетектирования в

На рис. 1 представлена обобщённая принципиальная схема лидара. Рассмотрим принцип работы лидара, представленного на схеме. Короткий импульс лазерного излучения через передающую оптическую систему посылается в атмосферу, где происходит взаимодействие излучения с компонентами среды, которые частично поглощают и рассеивают его. Часть излучения, рассеянного в направлении назад, попадает на приёмную апертуру лидара и передаётся с помощью оптической системы в полихроматор для выделения температурно-чувствительных участков чисто вращательного спектра комбинационного рассеяния

интервале времени τ через время t после посылки в атмосферу зондирующего импульса,

$$n_i(r) = \frac{W \cdot f}{h \nu_0} \frac{\pi D^2}{4r} K \eta G(r) \beta_i(r) \frac{c \tau}{2} \exp \left(- \int_0^r (\alpha(\nu_0, x) + \alpha(\nu_i, x)) dx \right), \quad (1)$$

где W – энергия в импульсе; h – постоянная Планка; $r = \frac{ct}{2}$ – расстояние до рассеивающего объема; c – скорость света; ν_0 – частота лазерного излучения; K – общий коэффициент пропускания оптики; η – квантовая эффективность фотодетектора; D – диаметр прѐмной апертуры; $G(r)$ – геометрический фактор; $\beta_i(r)$ – профиль объемного коэффициента рассеяния назад для i -ой линии чисто вращательного спектра СКР; $\frac{c\tau}{2}$ определяет длину рассеивающего объема вдоль трассы зондирования; $\alpha(\nu, x)$ – профиль коэффициента ослабления атмосферы для частоты ν .

Для реализации методики выделяются четыре участка чисто вращательного спектра комбинационного рассеяния, чувствительные к температуре, как это показано на рис. 2. Линии с отрицательной зависимостью интенсивности от температуры объединяются вместе в одном канале:

$$n_{-} = \left(\sum_{\otimes \nu_i \in \otimes \nu[-]} n_i^{N_2} + n_i^{O_2} \right) \Big|_{[stokes]} + \left(\sum_{\otimes \nu_i \in \otimes \nu[-]} n_i^{N_2} + n_i^{O_2} \right) \Big|_{[antistokes]} \quad (2)$$

Линии с положительной зависимостью объединяются в другом канале:

$$n_{+} = \left(\sum_{\otimes \nu_i \in \otimes \nu[+]} n_i^{N_2} + n_i^{O_2} \right) \Big|_{[stokes]} + \left(\sum_{\otimes \nu_i \in \otimes \nu[+]} n_i^{N_2} + n_i^{O_2} \right) \Big|_{[antistokes]} \quad (3)$$

Как интенсивности, так и температурные чувствительности симметричных линий стоксовых и антистоксовых ветвей вращательного спектра комбинационного рассеяния имеют близкие значения. Это делает практически одинаково эффективным их использование для измерения температуры.

Отношение сигналов в двух каналах, объединяющих линии с одной и той же зависимостью от температуры

$$\begin{aligned} N_{[-]} &= n_{[-]} \otimes t, \\ N_{[+]} &= n_{[+]} \otimes t, \end{aligned} \tag{4}$$

накопленных в течение интервала времени $\otimes t$, необходимое для достижения требуемых статистических характеристик сигналов, не содержит никаких компонентов аппаратной функции лидара, зависящих от расстояния:

$$R = \frac{N_{[-]}}{N_{[+]}} = \frac{\sum_{\substack{\text{stokes} \\ \text{antistokes}}} \sum_{N_2, O_2} \sum_{v_i \in \otimes v_{[-]}} K_i \beta_i \exp\left(-\int_0^r \alpha(v_i, x) dx\right)}{\sum_{\substack{\text{stokes} \\ \text{antistokes}}} \sum_{N_2, O_2} \sum_{v_i \in \otimes v_{[+]}} K_i \beta_i \exp\left(-\int_0^r \alpha(v_i, x) dx\right)} \quad (5)$$

что делает удобным его применение для измерения температуры воздуха.

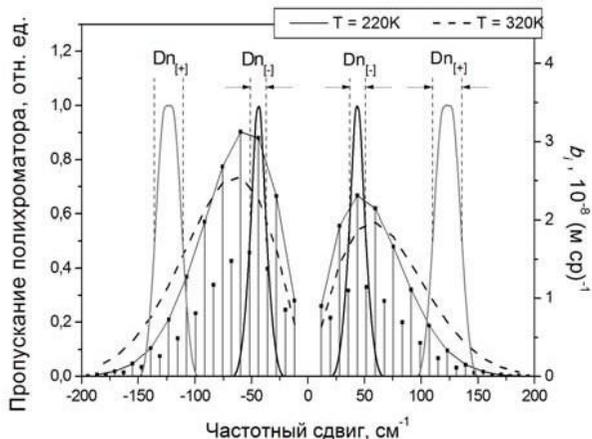


Рисунок 2 – Инструментальная функция полихроматора и огибающие чисто вращательного спектра комбинационного рассеяния азота для 220 К и 320 К. Спектры кислорода для простоты опущены

Аналитический вид функции $R(T)$, полученной при калибровке, может быть задан приближенно с помощью аппроксимации полиномом по обратным степеням T :

$$R = \exp\left(\sum_{k=0}^n \frac{A_k}{T^k}\right) \quad (6)$$

Температурная чувствительность (крутизна) отношения $R(T)$ определяется температурной зависимостью (рис. 3) и интенсивностью выделяемых спектральных линий. Время накопления сигнала зависит от общей интенсивности выбранного участка спектра. Очевидно, что выбор правильной комби-

нации спектральных линий в участках обеспечивает максимальную чувствительность лидара при минимальном времени измерения.

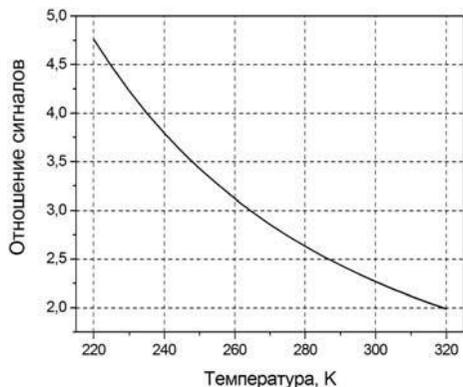


Рисунок 3 – Зависимость отношения сигналов от температуры воздуха

Спектроскопическая задача выделения чувствительных к температуре линий чисто вращательного спектра СКР на молекулах азота и кислорода может быть решена различными инструментальными методами. Но, в целом, существует только два типа диспергирующих элементов, способных обеспечить спектральное разрешение, необходимое для выполнения поставленных нами задач: дифракционные решетки и интерференционные фильтры. Принципиальная оптическая схема полихроматора на основе интерференционных фильтров, показанная на рис. 4, представляет собой типичную и популярную в последнее время конструкцию.

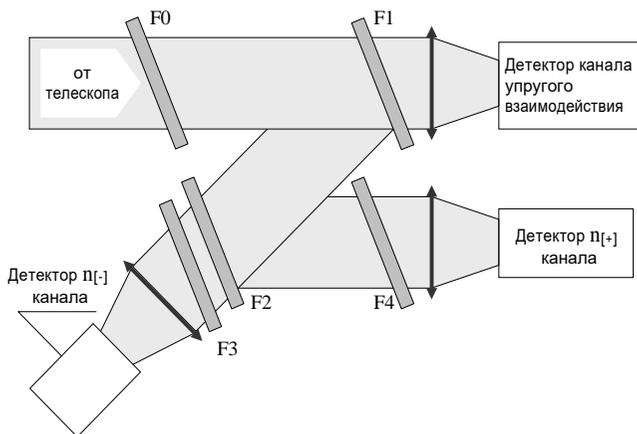


Рисунок 4 – Принципиальная оптическая схема полихроматора на основе интерференционных фильтров

Широкополосный интерференционный фильтр F0 предназначен для грубого выделения линии упругого рассеяния всей полосы чисто вращательного спектра СКР подавления фона неба в широком спектральном диапазоне. Комбинации функций отражения и пропускания остальных четырёх фильтров позволяют выделить нужные участки спектров СКР и подавить линию несмещённого рассеяния.

Современная технология позволяет добиться достаточно высокой эффективности интерференционных фильтров. Так, например, «фильтровый» полихроматор (см. рис. 4), предназначенный для видимой области спектра, может иметь пропускание порядка 68% в канале, содержащем линии СКР с отрицательной температурной чувствительностью (сочетание F1, F2, F3), и около 80% в канале, содержащем линии с положительной температурной чувствительностью (сочетание F1, F2, F3, F4). Эффективность фильтров, предназначенных для УФ-диапазона, также может быть достаточно высокой. Согласно литературным данным для «фильтрового» полихроматора предназначенного для селекции спектров СКР в окрестности линии возбуждения 355 нм, максимальное пропускание составляло около 34% для комбинации фильтров F2 и F3 и около 52% для фильтра F4. При этом уровень подавления линии несмещённого рассеяния для «фильтрового» полихроматора был не хуже, чем 10^7 .

Как показано в диссертации, использование суммы стоксовой и антистоксовой ветвей чисто вращательных спектров СКР позволяет получить выигрыш в сигнале в 2,24 и 2,86 раз в каналах $n_{[-]}$ и $n_{[+]}$ соответственно по сравнению с использованием только антистоксовой ветви. В этом случае уровень подавления линии несмещённого рассеяния в каналах КР «фильтрового» монохроматора должен быть не хуже, чем $5,6 \cdot 10^7$ для возбуждения на 532 нм и около 10^7 для возбуждения на 355 нм, чтобы обеспечить допустимое смещение оценки температуры при измерении внутри облака. Насколько нам известно, одновременное выделение стоксовой и антистоксовой ветвей с помощью полихроматора на основе фильтров пока никем не реализовано. Очевидно, что уровень подавления линии несмещённого рассеяния «фильтрового» монохроматора не обеспечивает надёжность измерений температуры в оптически плотных аэрозольных атмосферных образованиях.

На рис. 5 представлен альтернативный инструментальный подход, осуществлённый на базе двойного полихроматора с дифракционными решетками и волоконно-оптической передачей оптических сигналов.

Двойной полихроматор предназначен для выделения четырёх информативных участков спектров СКР по обе стороны от линии возбуждающего излучения и для подавления линии несмещённого рассеяния. Уровень подавления линии несмещённого рассеяния 10^8 – 10^{10} , в зависимости от типа применяемых дифракционных решеток. Рассмотрим кратко принцип действия дифракционного полихроматора.

Оптический сигнал, собранный приёмным телескопом лидара, проходит по моноволоконному световоду, диаметр которого соответствует диаметру полевой диафрагмы лидара, и поступает во входной световодный блок первого полихроматора (рис. 5). Расходящийся пучок лучей, выходящий из торца световода, коллимируется с помощью объектива полихроматора и направляется на отражательную дифракционную решетку, установленную таким образом, что дифрагированный свет с длиной волны возбуждающего излучения возвращается в обратном направлении и фокусируется тем же объективом на поверхности торца входного блока световодов, образуя полосу диспергированного света в фокальной плоскости линзы, чуть ниже входного световода (рис. 6, а). Пять оптических волокон, расположенных вдоль линии дисперсии первого полихроматора, предназначены для выделения линии упругого рассеяния и четырёх информативных участков чисто вращательного спектра СКР – двух участков в стоксовой ветви и двух в антистоксовой, как это показано на рис. 6, а. Центральный световод в линии световодов совмещён с изображением торца входного световода на длине волны упругого рассеяния. Выделенный оптический сигнал упругого рассеяния поступает по оптическому волокну на фотодетектор.

Остальные четыре световода содержат сигналы информативных участков спектра СКР, которые, в принципе, также могли бы быть отправлены на фотоприёмники. Однако уровень диффузного фона от мощной линии несмещённого рассеяния, определяемый контрастом дифракционной картины, который позволяет обеспечить дифракционная решетка, обычно составляет 4–6 порядков в зависимости от технологии изготовления решетки. Этой величины явно не достаточно, если принять во внимание оценки, сделанные выше.

Очевидно, что требуется дополнительная очистка сигналов СКР от фона линии несмещённого рассеяния. Для этого предлагается пропустить излучение через ещё один монохроматор. В представленной конфигурации эта процедура осуществляется с помощью дополнительного световодного блока, являющегося точной копией первого во входной части (рис. 6). При этом четыре выходных световода первого блока, содержащие сигналы СКР, устанавливаются попарно симметрично относительно оптической оси второго полихроматора, сохраняя при этом координаты положения пар световодов вдоль плоскости дисперсии и разделяя их попарно в вертикальной плоскости. При этом, например, дальние световоды, содержащие $n_{[+]}$, располагаются в нижней части блока, ближние световоды, содержащие $n_{[-]}$, – в верхней части. Направление дисперсии полихроматора за счёт установки дифракционной решетки изменяется на противоположное таким образом, чтобы изображения торцов симметрично расположенных световодов, содержащих симметричные участки спектра, сошлись в одну точку в месте установки выходных световодов. Изображения торцов световодов для длины волны несмещённого рассеяния при этом будут формироваться по зако-

нам геометрической оптики без смещения вдоль линии дисперсии полихроматора. Такой подход позволяет отделить монохроматический фон, попавший в сигнальные световоды от сигналов СКР, и одновременно объединить участки спектра стоксовых и антистоксовых компонентов с одной и той же чувствительностью оптически. Два выходных световода проводят спектрально очищенные сигналы СКР к фотодетекторам (см. рис. 5).

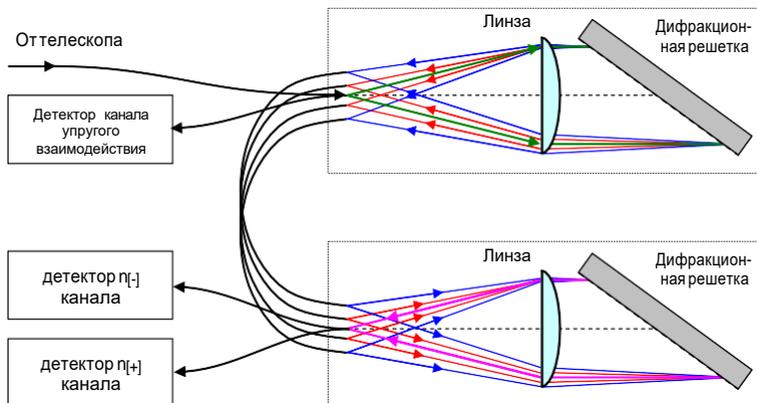


Рисунок 5 – Принципиальная оптическая схема двойного полихроматора с дифракционными решётками и волоконно-оптической передачей оптических сигналов

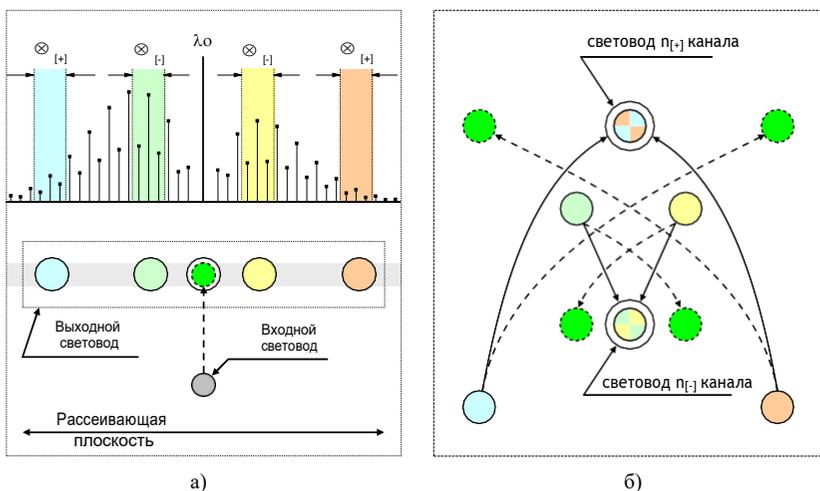


Рисунок 6 – Расположение световодов в световодных блоках, установленных в фокальной плоскости первого (а) и второго (б) полихроматора. Пунктирная и сплошные стрелки показывают положение изображений торцов световодов в упругом и неупругом свете соответственно

На основе предложенного принципа была создана серия спектральных приборов, которая в течение нескольких лет проходила испытания на действующих лидарных системах Европейской лидарной сети EARLINET (European Research Lidar Network). Лидарные измерения вертикального распределения температуры атмосферы, полученные с использованием двойного монохроматора, сравнивались с данными радиозондирования. Результаты сравнения показали высокий уровень совпадения данных. При этом было показано, что вне зависимости от используемой длины волны зондирующего излучения применение двойного монохроматора обеспечивает высокие метрологические качества системы измерения температуры даже в оптически плотных аэрозольных образованиях. Результаты некоторых испытаний приводятся на рис. 7.

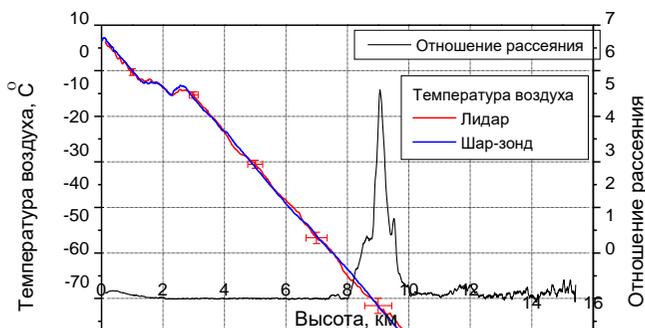


Рисунок 7 – Высотный ход температуры атмосферы, полученный с помощью лидара и шара-зонда, и отношение рассеяния на длине волны 532 нм. Лидарные измерения: 10: 00–12: 00 UTC; запуск шара-зонда: 11: 52–12: 58 UTC, ALOMAR, 2009.11.04 (Связь воздушного шара с наземной станцией была потеряна на высоте 11,3 км)

Как видно из рисунка, профили температуры, полученные синхронно лидаром и радиозондом, не отличаются в пределах ошибок измерений по всей трассе зондирования, включая ближнюю зону лидара. Это результат применения специального метода перемешивания оптических сигналов, специально разработанного для устранения систематической ошибки в измерениях температуры в ближней зоне лидара, где происходит формирование геометрической функции лидара.

Существует принципиальная причина различия формы функций перекрытия лидара в разных спектральных каналах, даже если они сформированы одной и той же оптической системой и единственной полевой диафрагмой. Неэквивалентность параметров оптических элементов относи-

тельно углов падения и координат хода лучей в них приводит к модуляции уровня оптических сигналов в зависимости от дальности приёма. Влияние этой модуляции может быть различно для разных спектральных каналов. Именно поэтому в СКР-лидаре всегда есть небольшое отличие в форме геометрических факторов спектральных каналов, которое может достигать нескольких процентов относительных изменений. И если для большинства задач лазерного зондирования такая разница не скажется на точности измерения, то для случая измерений температуры этот фактор может приводить к систематической ошибке порядка 10°K .

Для устранения этого эффекта после проведения скрупулёзных исследований причин возникновения геометрического фактора отношения сигналов СКР (зависимости отношения R от дальности при постоянной температуре) был предпринят поиск возможных способов его устранения. В результате было найдено решение, основанное на свойстве моноволоконных световодов быстрой потери «памяти» о координате точки вхождения луча в плоскость торца при распространении луча по световоду. На основе этой идеи была предложена конструкция оптического гомогенизатора пучка лучей (оптического скремблера), позволяющего проводить полное усреднение лучей оптического тракта по углу прихода и координате входа в полевую диафрагму. Как показали эксперименты, оптический скремблер, установленный в приёмный оптический тракт СКР-лидара, позволяет снизить влияние геометрической функции лидара на результаты измерения температуры до пренебрежимо малого уровня (защищаемое положение № 1).

Конструктивно оптический скремблер состоит из двух отрезков моноволоконных световодов и шаровой линзы, расположенных таким образом, что выходной торец первого световода находится в передней фокальной плоскости линзы, а входной конец второго световода находится вблизи задней фокальной плоскости линзы (рис. 8).

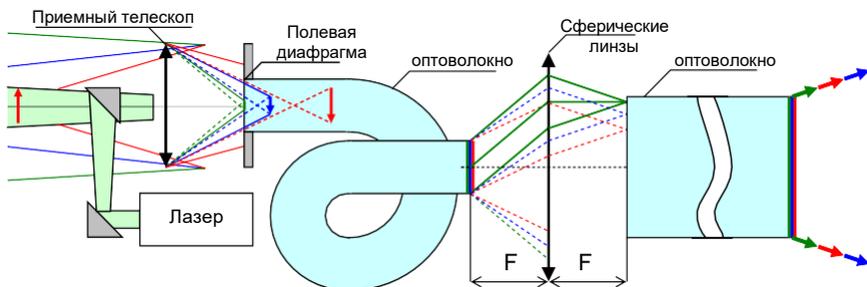


Рисунок 8 – Принцип оптического скремблирования. Изображение рассеивающего объема в приёмном телескопе, показанное схематично зелеными, синими и красными входными лучами для разной дальности расположения лазерного импульса

Применение оптического скремблера позволяет повысить устойчивость оптической схемы к расстройкам и забыть о проблеме геометрического фактора отношения сигналов. Очевидно, что применение оптического скремблера даст результат и в любых других случаях прецизионных оптических измерений отношений.

В заключительной части главы приводятся результаты апробации лидарного метода дистанционного определения температуры для нескольких версий лидарных систем различного назначения. Сравнение лидарных профилей температуры с данными радиозонда обнаруживают согласие в пределах статистических погрешностей измерения.

В третьей главе обсуждается методика дистанционного определения влажности атмосферы на основе использования колебательно-вращательных спектров СКР на молекулах атмосферного водяного пара и азота. Дается всесторонний анализ источников погрешностей измерения отношения смеси водяного пара в лидарной схеме. Предложены методы их устранения. Подробно описывается аппаратура СКР-лидара. Анализируются аппаратурные факторы систематических ошибок, возникающих при лидарных измерениях вертикального распределения отношения смеси водяного пара. Находятся методы их устранения. Особое внимание уделяется обеспечению круглосуточных измерений в условиях интенсивного фонового излучения. Приводятся данные сравнительных испытаний лидарных и синхронных радиозондовых измерений с использованием различных контактных сенсоров измерения влажности. Приводятся примеры длительных временных серий измерений.

Описана аппаратура для дистанционных лидарных измерений содержания жидкой воды в атмосфере на базе многоканального спектроскопического подхода.

В конце главы представлены данные уникальных спектроскопических наблюдений спектров СКР жидкой воды в облачных слоях атмосферы с помощью 32-канального СКР-лидара с высоким пространственным разрешением.

Одним из стандартных приложений технологии СКР лидара является профилирование влажности с использованием колебательно-вращательной полосы СКР водяного пара. В последнее время появился интерес также к применению этой технологии для попыток дистанционного измерения содержания жидкой воды в атмосфере при помощи полосы СКР жидкой воды, которая смещена в спектре в синюю область от Q-ветви ν_1 колебательно-вращательной полосы комбинационного рассеяния водяного пара. Основная трудность подобных измерений заключается в том, что необходимо выполнить очень высокие требования к спектральной чистоте при выделении полосы СКР жидкой воды, чтобы её можно было увидеть на фоне интенсивной линии несмещенного аэрозольного рассеяния в оптиче-

ски плотных средах (дымка, туман, облака). Именно в таких средах содержание жидкой воды в атмосфере становится заметным и требующим изучения.

Еще одной проблемой развития лидарной технологии определения содержания жидкой воды в атмосфере является неизвестное значение эффективного сечения комбинационного рассеяния молекул воды, находящейся в жидко-капельном состоянии, которое можно оценить лишь приблизительно. Именно поэтому и по сей день существуют большие расхождения между теоретическими данными о содержании жидкой воды в атмосфере и некоторыми пробными данными лидарных измерений. И это является предметом обсуждения в научном сообществе. Именно с целью выяснения спорных вопросов экспериментальных исследований содержания жидкой воды в атмосфере был предложен новый подход к постановке лидарного эксперимента и предложена новая версия СКР-лидара.

Основными особенностями новой версии СКР лидара для определения содержания жидкой воды в атмосфере являются обеспечение высокого уровня подавления линии несмещенного рассеяния (10^{14}) и применение инновационной 32-канальной технологии фотодетектирования пространственно-разрешенного атмосферного отклика в 32 спектральных каналах одновременно. Для получения высокого уровня подавления, необходимого для работы лидара в плотных атмосферных аэрозольных образованиях, использовался двойной монохроматор с функцией спектрографа в сочетании с голографическим notch-фильтром на третью гармонику Nd:YAG лазера (355 нм). Уровень подавления двойного монохроматора для длины волны 355 нм был не менее 10^8 , а уровень подавления notch-фильтра – более 10^6 .

В первой камере двойного монохроматора для отделения линии несмещенного рассеяния от полос спектров комбинационного рассеяния H_2O использовалась вогнутая голографическая решетка. Вторая камера была построена по автоколлимационной схеме на основе линзового объектива и плоской дифракционной решетки с большой длиной заштрихованной части, обеспечивающей высокое спектральное разрешение. В плоскости расположения спектра на выходе второй камеры двойного монохроматора-спектрографа был размещён фотокатод 32-анодного ФЭУ компании «Хамаматсу» с размером чувствительной области фотокатода $32 \times 7 \text{ мм}^2$ (32 мм области дисперсии монохроматора соответствовало охвату спектрального диапазона примерно в 1000 см^{-1} в области спектра 400 нм).

Типичные экспериментальные данные о пространственном и спектральном распределении лидарных откликов в области предполагаемого расположения полос СКР жидкой воды и водяного пара, полученные с использованием предлагаемого подхода и разработанной многоканальной системы регистрации, показаны на рис. 9.

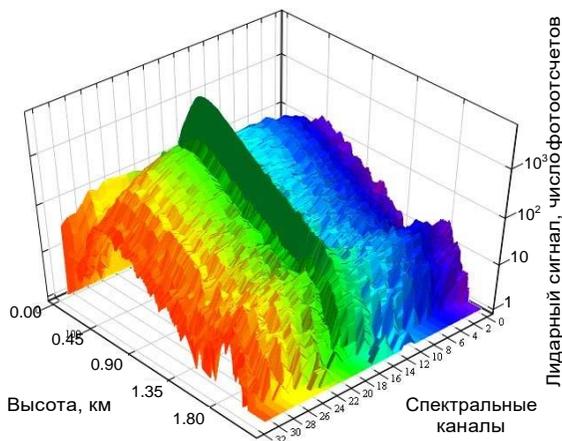


Рисунок 9 – Пространственно-разрешенный спектр комбинационного рассеяния воды, полученный с помощью 32-канального СКР лидара (чем выше порядковый номер спектрального канала, тем больше частотный сдвиг СКР)

Область спектра, представленная на рис. 9 32 лидарными откликами, обозначенными порядковыми номерами спектральных каналов, должна содержать как компоненты спектра СКР жидкой воды, так и Q-ветвь ν_1 и колебательно-вращательные полосы паров воды слева и справа от неё. Лидарный сигнал в 18-м канале соответствует расчётному положению Q-ветви и выступает на спектральной диаграмме в виде гребня. Кривые, изображенные на рисунке справа от гребня Q-ветви, представляют собой часть спектра с меньшими частотными сдвигами, расположенную ближе к линии возбуждающего излучения по сравнению со сдвигом Q-ветви. Вид лидарных сигналов отражает особенности вертикальной стратификации атмосферы во время измерений в виде наличия облака на высоте порядка 1,8 км. Облачные слои имеют высокий градиент вертикального распределения количества жидкой и кристаллической воды на нижней границе, поскольку, как правило, состоят из водяных капель и ледяных кристаллов. Такие атмосферные образования как нельзя лучше подходят для проверки работоспособности лидарного метода определения содержания воды в атмосфере в жидкой и твёрдой фазах. Как видно из рисунка, интенсивность лидарных откликов во всех спектральных каналах в области высот от 0 до начала облака на высоте примерно 1,7 км плавно изменяется с высотой, отражая однородное состояние атмосферы с малым по сравнению с облаком содержанием аэрозольных частиц и, как следствие, с малым содержанием жидкой воды. Поведение лидарных откликов на высотах более 1,7 км, где начинается нижняя граница облака, меняется, и характер этих изменений как раз и представляет особый интерес.

Однако в этом случае отклики в левой части спектра от Q-ветви (канал № 9) должны вести себя с изменением высоты также, как и отклик Q-ветви, то есть внутри облака их интенсивность должна снижаться. Но этого не происходит, и при входе в облако происходит деформация спектров лидарных откликов как слева, так и справа от Q-ветви.

Это явление было впервые обнаружено в 2000 г. автором при проведении экспериментов по зондированию облаков с использованием 32-канального СКР-лидара, созданного при финансовой поддержке Корейского Института Атомной Энергии, г. Тэйджон, Республика Корея. Результаты этих экспериментов впервые обсуждались на International Laser Radar Conference (ILRC-21) в Квебеке в 2002 г. Затем были поставлены более тщательные эксперименты при поддержке Института Метеорологии Макса Планка, г. Гамбург, и Института Тропосферных Исследований, г. Лейпциг, Германия, в 2004 г. Результаты этих экспериментов и являются предметом рассмотрения в диссертации.

Трудно найти достаточно обоснованное объяснение наблюдаемого явления деформации спектров СКР при их возбуждении в таком сложном природном аэрозольном образовании как плотное водяное облако. Очевидно, что многообразие процессов формирования и трансформации компонентов облачной среды определяет сложность структуры зоны подоблачного слоя и кромки облака. Именно эта часть облака наиболее интересна и одновременно доступна для исследования лидарными методами в силу умеренной оптической плотности. Процесс экспериментальных исследований состава и структуры естественных облаков сталкивается с огромными трудностями, связанными с удалённостью, нестабильностью и нестационарностью объекта исследования. В литературе содержатся достаточно скудные сведения по этому вопросу. Очевидно, что применение лидарных методов, способных получать информацию об удалённых объектах оперативно и дистанционно, может быть особенно эффективным именно для исследования процессов в облаках. Применение же тонких спектроскопических методов, способных извлечь наибольшее количество информации об объекте при его дистанционном исследовании, способно дать адекватный эффект.

Именно поэтому было потрачено много усилий для создания 32-канальной лидарной системы с высоким уровнем подавления линии несмещённого рассеяния и высоким пространственным и временным разрешением. Результаты, полученные с помощью этой лидарной системы, были обобщены и сформулированы в виде защищаемого положения № 2, являются первыми, и несмотря на трудности интерпретации, очевидно, могут поставить некоторые вопросы, ответы на которые появятся только в процессе проведения дальнейших исследований.

В четвёртой главе предлагается метод лидарных измерений аэрозольных коэффициентов рассеяния и лидарного отношения с использованием эффекта СКР и аэрозольного рассеяния. При этом для разделения аэрозольной и молекулярной компонентов рассеяния предлагается использовать чисто вращательные спектры СКР на молекулах атмосферного азота и кислорода. Приводится математическая формулировка метода. Проводится физическое обоснование применения чисто вращательных спектров СКР на молекулах азота и кислорода для дистанционного определения оптических характеристик аэрозолей. Анализируются атмосферно-оптические и аппаратурные факторы, приводящие к погрешностям определения оптических характеристик атмосферы. Приведено обоснование выбора параметров оптических элементов и схемы построения СКР-лидара, рассмотрены вопросы поиска путей устранения влияния факторов, искажающих исходную информацию, проведены оценки погрешностей измерений. Одним из таких факторов является температурная зависимость коэффициента обратного рассеяния отдельной полосы чисто вращательного спектра, используемой в качестве сигнала молекулярного рассеяния для доопределения лидарного уравнения аэрозольного рассеяния. В работе был проведён анализ температурной зависимости коэффициента обратного рассеяния для отдельной линии и для участков спектра СКР и был предложен способ устранения температурной зависимости за счёт использования в качестве сигнала комбинации двух участков чисто вращательного спектра с противоположной температурной зависимостью. Этот приём позволяет полностью устранить влияние температурной стратификации атмосферы на результаты дистанционного определения оптических параметров атмосферы (защищаемое положение № 3).

В конце главы обсуждаются результаты экспериментальных исследований метода и некоторых перспектив его технического совершенствования.

В заключении в краткой форме обобщены основные результаты проведённых исследований.

В пятой главе рассмотрена совокупность эффектов взаимодействия излучения с веществом с точки зрения их возможного практического использования для дистанционной диагностики химического состава окружающей среды. Приведен краткий обзор методов дистанционного газоанализа атмосферы на основе эффекта СКР.

Проведен всесторонний анализ особенностей применения эффекта СКР при разработке лидарного метода. Выявлены факторы, ограничивающие чувствительность и определяющие помехоустойчивость СКР-лидарного метода при использовании источника излучения в УФ диапазоне длин волн. Предложены технические решения и разработаны методические приёмы, позволяющие повысить чувствительность и точность метода.

Разработана математическая модель процесса зондирования атмосферы на основе эффекта СКР в «солнечно-слепой» области спектра. С помощью предложенной модели на базе априорной спектроскопической информации об объекте обнаружения при заданных параметрах среды распространения излучения и параметрах приемопередающей аппаратуры моделировались пространственно-временные характеристики СКР-лидарного сигнала. Определялось ожидаемое время обнаружения для различных условий численного эксперимента. По результатам моделирования определены требования к компонентам СКР-лидара и проведена его разработка.

Далее в главе представлено подробное аналитическое описание компонентов аппаратуры разработанного СКР-лидара, приведены принципиальные схемы и технические характеристики лидара. Описаны условия проведения экспериментов по дистанционному обнаружению химических соединений. Представлена методика создания контролируемых концентраций веществ в локальном объеме в газовой фазе. Представлены результаты экспериментальной проверки помехоустойчивости метода. Экспериментально обоснованы значения минимально обнаружимых концентраций для СКР-лидара при работе по парам некоторых химических соединений.

Использование матричного фотоприемника в приемной оптико-электронной системе СКР-лидара оправданно в связи с необходимостью регистрации спектров СКР во всей области частотных сдвигов одновременно. Однако элементы матрицы фотоприемника при детектировании сверхслабых сигналов СКР на малых газовых компонентах неизбежно подвергаются воздействию мощных оптических сигналов СКР на молекулах основных газовых компонентов атмосферы (азота и кислорода), интенсивности которых на 3–6 порядков выше. Превышение допустимого динамического диапазона изменения сигналов приводит к возникновению эффектов насыщения, растекания зарядов по соседним элементам матрицы и, соответственно, к искажению результатов измерений.

С другой стороны, эффект рассеяния излучения интенсивных компонентов спектра СКР-лидарного отклика на дифракционной решетке и других оптических элементах полихроматора будет создавать шумовой пьедестал в регистрируемом спектре и ограничивать чувствительность лидарной системы (рис. 10).

Именно поэтому для корректного измерения низких концентраций загрязняющих веществ и реализации предельного уровня чувствительности СКР-лидара необходимо блокировать оптические сигналы интенсивных полос СКР на молекулах азота и кислорода на входе в спектрограф. Для этого между телескопом и спектрографом достаточно установить дополнительный интерференционный фильтр, подавляющий полосы СКР на молекулах азота и кислорода и пропускающий рабочие участки спектра. При

этом положения центров областей воздействия Q -ветвей полос кислорода и азота составляют 1556 см^{-1} и 2331 см^{-1} соответственно при их ширине порядка 300 см^{-1} . Очевидно, что дополнительный фильтр должен обеспечивать высокий уровень подавления излучения в области частотных сдвигов от 1400 до 1700 см^{-1} и от 2180 до 2480 см^{-1} при высоком пропускании в остальном диапазоне области частотных сдвигов.

Задачу спектрального подавления интенсивных СКР-лидарных откликов азота и кислорода воздуха можно реализовать и другими способами. Например использованием нескольких монохроматоров или сочетания монохроматора и набора интерференционных фильтров. И если применение нескольких монохроматоров в УФ диапазоне длин волн не вызывает трудностей, то изготовление интерференционных фильтров с высоким пропусканием сталкивается с технологическими проблемами.

Как правило, лидарный метод определения концентрации загрязняющих веществ в атмосфере с помощью эффекта СКР строится на принципе измерения отношения интенсивности сигнала СКР на молекулах i -ой компоненты загрязняющих веществ к интенсивности опорного сигнала – сигнала Q -ветви колебательно-вращательных полос СКР на молекулах азота (или кислорода). В случае использования технологии подавления интенсивных откликов колебательно-вращательных полос СКР на молекулах азота и кислорода с целью повышения чувствительности метода возникает проблема нормировки сигнала. Очевидно, что идея использования сигналов СКР на парах воды или углекислом газе не очень подходит, так как концентрация молекул водяного пара и углекислого газа в атмосфере непостоянна. Одноатомные газы не имеют откликов СКР. Остальные постоянные газовые составляющие атмосферы имеют концентрацию ниже, чем пороговая чувствительность метода СКР.

В тоже время известно, что спектр СКР на молекулах азота и кислорода кроме основных колебательно-вращательных полос также содержит и более слабые полосы, соответствующие их обертонам (рис. 11). Так, например, значение отношения сечений СКР Q -ветвей первого обертона и основного тона при возбуждении на длине волны 488 нм для азота составляет 1×10^{-3} , а для кислорода $3,4 \times 10^{-4}$. Можно показать, что интенсивности сигналов первых обертонов азота или кислорода будут сравнимы с интенсивностями сигналов СКР на загрязняющих веществах при их концентрациях порядка сотен ppm, что, очевидно, позволит проводить относительные измерения интенсивностей примерно в одном масштабе в пределах допустимого динамического диапазона матрицы фотоприёмников.

Именно поэтому было предложено использовать в качестве опорного сигнала для измерения низких концентраций химических веществ в атмосфере методом СКР первый обертон колебательно-вращательной полосы СКР на молекулах кислорода или азота (защищаемое положение № 4).

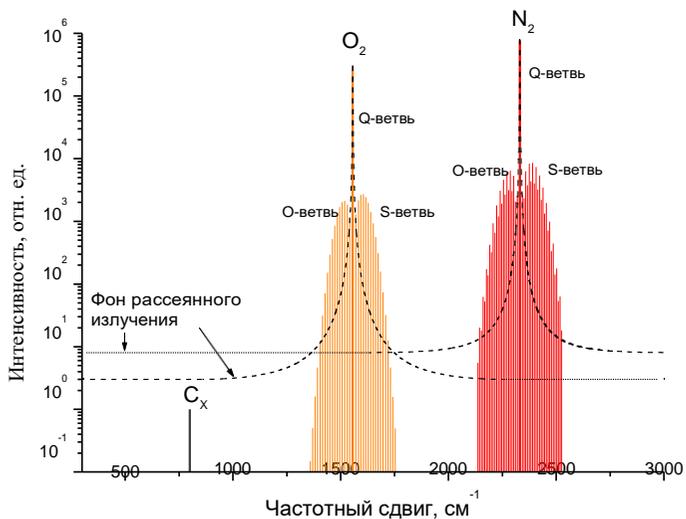


Рисунок 10 – Колебательно-вращательные полосы СКР на молекулах кислорода и азота воздуха и полоса СКР на молекулах химического вещества (C_x) с концентрацией 1 ppm. Пунктирная линия – интенсивность, эквивалентная фону рассеянного излучения спектрографа на основе голографической дифракционной решетки

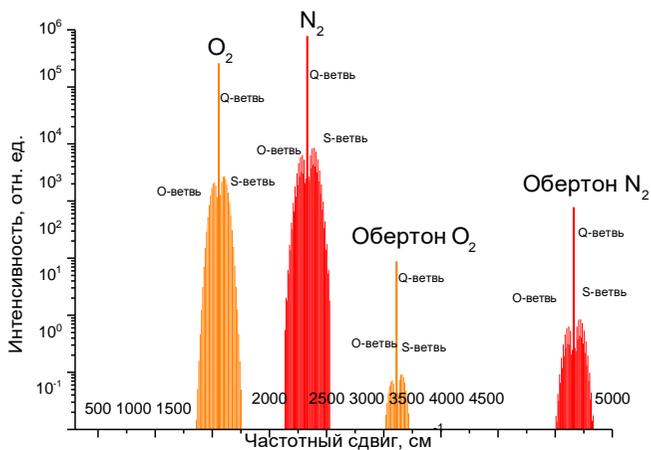


Рисунок 11 – Колебательно-вращательные полосы СКР на молекулах кислорода и азота воздуха и их первые обертоны

Предложенный способ снижения динамического диапазона изменения сигналов в рабочей спектро-аналитической области матричного фотоприемника позволяет обеспечить оптимальный режим фотодетектирования и добиться предельных значений чувствительности СКР-лидара.

Кроме того, не следует забывать о том, что СКР-лидарный отклик от первого обертона кислорода, о существовании которого не всегда помнят экспериментаторы (рис. 11), будет ограничивать чувствительность лидара в области частотных сдвигов 3089 см^{-1} . Как показывают оценки, для типичных значений сечений СКР чувствительность СКР-лидара в области 3089 см^{-1} будет ограничена значением 100 ppm . Обертон азота, к счастью, лежит за пределами области возможных частотных сдвигов и не может повлиять на работоспособность СКР-лидара.

Действительно, при испытании СКР-лидара в чистой атмосфере в спектре СКР кроме основных полос СКР атмосферных газов были обнаружены полосы ($267\text{--}268 \text{ нм}$ и $280\text{--}281 \text{ нм}$), соответствующие обертонам кислорода и азота соответственно (рис. 12). После применения специальных мер по дополнительному подавлению основных полос СКР азота и кислорода в процессе испытаний СКР-лидара была экспериментально подтверждена чувствительность порядка 1 ppm .

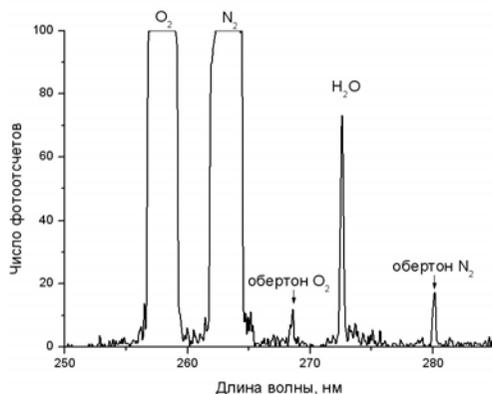


Рисунок 12 – Спектр СКР чистого атмосферного воздуха, зарегистрированный в режиме счета фотонов (видны полосы обертонов азота и кислорода) при возбуждении на длине волны $248,3 \text{ нм}$

В конце главы сформулированы выводы и перечислены основные результаты, полученные в главе.

Шестая глава посвящена актуальной теме разработки методов и средств дистанционного обнаружения взрывчатых веществ и содержит новейшие результаты, полученные в течение последних пяти лет.

В главе дана краткая характеристика взрывчатых веществ как объекта обнаружения. Сделан подробный обзор оптических методов обнаружения ВВ. По результатам сравнительного анализа выбран метод, наиболее подходящий для построения системы дистанционного обнаружения паров ВВ в атмосфере на его основе.

Далее в главе детально рассматривается и анализируется лидарный метод обнаружения паров ВВ на базе эффекта одночастотного лазерного фотолиза и лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛФ/ЛИФ) NO-фрагментов. Дано краткое описание метода обнаружения на основе одночастотного ЛФ/ЛИФ NO-фрагментов, описан принцип применения метода в лидарной схеме. Строится модель каскадного процесса лазерного фотолиза – лазерно-индуцированной флуоресценции продуктов фрагментации молекул ВВ. На основе решения системы кинетических уравнений предложено математическое представление двухступенчатого процесса фотофрагментации молекул ВВ с последующим лазерным возбуждением флуоресценции NO-фрагментов и получено выражение для лидарного уравнения.

С использованием полученных аналитических выражений произведён расчёт эффективности процесса обнаружения паров ВВ. Проведён анализ и сделаны оценки степени возможного влияния атмосферных факторов на работу лидарного обнаружителя паров ВВ в реальных условиях. Проведены оценки интенсивности лидарных откликов, и на их основании определены технические требования к источнику излучения и оптическим компонентам. Выработан статистически обоснованный критерий обнаружения. Произведён расчёт времени обнаружения паров ВВ в зависимости от дальности обнаружения. Рассмотрены вопросы аппаратурной реализацией лидарного обнаружителя паров ВВ. Сделаны инженерные расчёты. Разработана конструкторская документация. Создан опытный образец лидарного обнаружителя паров ВВ (ДОВВ-1).

Представлены результаты экспериментальных исследований характеристик опытного образца лидарного обнаружителя. Приводятся данные экспериментального определения рабочего положения линии возбуждающего излучения. Приведены результаты апробации опытного образца лидарного обнаружителя при обнаружении паров тротила и тротил-гексогена. Описана методика оценки чувствительности лидарного обнаружителя паров ВВ. Приведены результаты экспериментальной оценки предельной чувствительности лидарного обнаружителя с использованием генератора стандартной концентрации паров ТНТ.

Задача обнаружения сверхнизких концентраций паров ВВ требует применения высокоэффективных процессов взаимодействия излучения с веществом с большим сечением взаимодействия.

Как правило, методы флуоресцентной спектроскопии, являясь дистанционными, при благоприятных условиях позволяют добиться высокой чув-

ствительности по концентрации (единицы ppt). И это единственный путь реализации оптического метода с адекватной чувствительностью. Однако известно, что сложные молекулы ВВ малоактивны в процессах флуоресценции в силу высокой вероятности безизлучательной релаксации. Именно поэтому наблюдаемая в парах ВВ флуоресценция очень слаба несмотря на высокое сечение поглощения в УФ диапазоне длин волн.

Известно, что при поглощении кванта света высокой частоты (УФ диапазон длин волн) молекулы ВВ приобретают энергию, достаточную для диссоциации, и распадаются на фрагменты (осколки). Этот процесс называется *фотолизом*, *фотодиссоциацией* или *фотофрагментацией*. При этом оказывается, что образовавшиеся осколки при определённых условиях могут быть переведены в возбуждённое состояние и вовлечены в процесс флуоресценции. Излучение флуоресценции фрагментов может быть использовано как косвенный признак присутствия молекул ВВ (рис. 13).

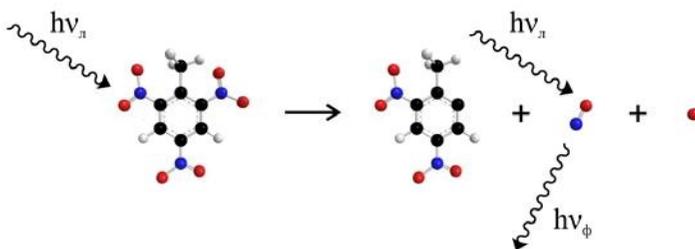


Рисунок 13 – Схема, поясняющая механизм лазерной фрагментации молекулы ВВ (в данном случае TNT) с последующим возбуждением NO-фрагмента: $h\nu_{\text{л}}$ – квант лазерного излучения, $h\nu_{\text{ф}}$ – квант флуоресценции

Применение лазерной фрагментации позволяет свести задачу обнаружения паров ВВ к задаче обнаружения более простых молекул, высокоактивных в процессе флуоресценции и с хорошо изученными спектроскопическими свойствами.

Очевидно, что использование метода на основе одночастотного лазерного фотолиза и лазерно-индуцированной флуоресценции NO-фрагментов является наиболее перспективным направлением в создании лазерного дистанционного обнаружителя паров ВВ с максимальной чувствительностью. Оценим более детально возможности применения этого метода в лидарной схеме.

Именно этот метод был взят за основу при разработке дистанционного обнаружителя паров ВВ. В качестве характеристического фрагмента была выбрана молекула оксида азота – характерный продукт фотофрагментации азотсодержащих взрывчатых веществ. При этом был выбран метод возбуждения флуоресценции молекулы NO со второго колебательного уровня основного электронного состояния на нулевой колебательный уровень электронного возбуждённого состояния.

Детальное исследование процесса фрагментации показывает, что населенность уровня $v'' = 2$ для NO-фрагментов на 7–8 порядков величины больше, чем тепловая населенность этого уровня. Именно поэтому лишь ничтожная часть молекул фонового NO, концентрация которого в промышленных зонах может достигать значений 50–100 ppb, будет участвовать во взаимодействии. Такой приём позволяет существенно снизить шум атмосферы и повысить чувствительность метода.

Таким образом, если возбуждать флуоресценцию со второго колебательного уровня основного состояния на нулевой колебательный уровень возбужденного состояния (переход $A^2\Sigma^+ (v' = 0) \leftarrow X^2\Pi (v'' = 2)$ на рис. 14), то, во-первых, будут возбуждаться *только* NO-фрагменты; во-вторых, процесс переизлучения будет *антистоксов*, т.е. полоса флуоресценции будет смещена в «синюю область» от возбуждающей линии излучения ($A^2\Sigma^+ (v' = 0) \rightarrow X^2\Pi (v'' = 0, 1)$), тогда как полосы флуоресценции примесей, возбужденных из основного состояния, будут, как обычно, смещены в «красную область» спектра и не перекроются с полосой флуоресценции NO-фрагментов. Очевидно, что возбуждение флуоресценции NO-фрагментов из второго колебательного состояния позволяет добиться высокой селективности и чувствительности и обеспечивает устойчивость метода к присутствию посторонних примесей.

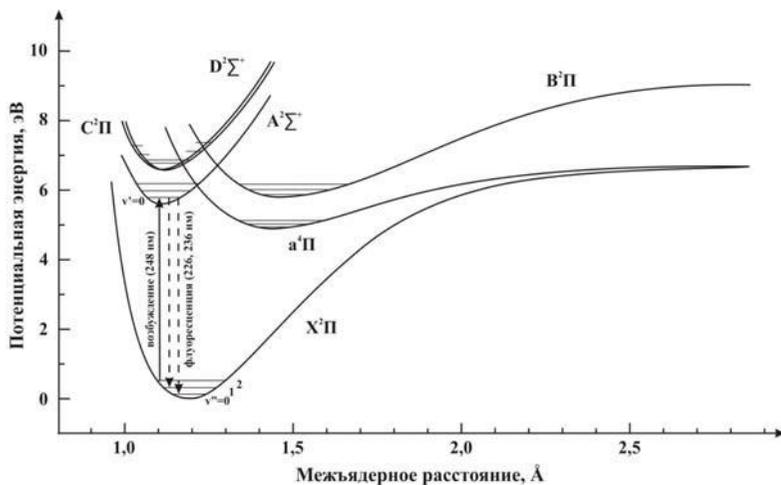


Рисунок 14 – Диаграмма энергетических уровней молекулы NO и схема переходов при лазерно-индуцированной флуоресценции. Длина волны 248 нм соответствует переходу $A \Sigma (v' = 0) \leftarrow X_2 \Pi (v'' = 2)$, а длины волн 226 и 236 нм – переходам $A \Sigma (v' = 0) \rightarrow X \Pi (v'' = 0, 1)$

Подобный механизм возбуждения ЛИФ оксида азота впервые был предложен при дистанционном исследовании процессов горения.

При реализации метода, с целью уточнения условий возбуждения, было рассчитано эффективное сечение взаимодействия для двухступенчатого процесса ЛФ/ЛИФ. Определены оптимальные условия возбуждения, сделаны оценки интенсивности сигналов. Для этого была построена модель и получено лидарное уравнение для двухступенчатого процесса «фотофрагментация – лазерно-индуцированная флуоресценция» как результат решения системы кинетических уравнений для населённостей энергетических состояний. Проведённые расчёты позволили определить зависимость эффективности процесса обнаружения от плотности энергии в inspected объёме (рис. 15) и определить её оптимальные значения (защитное положение № 5).

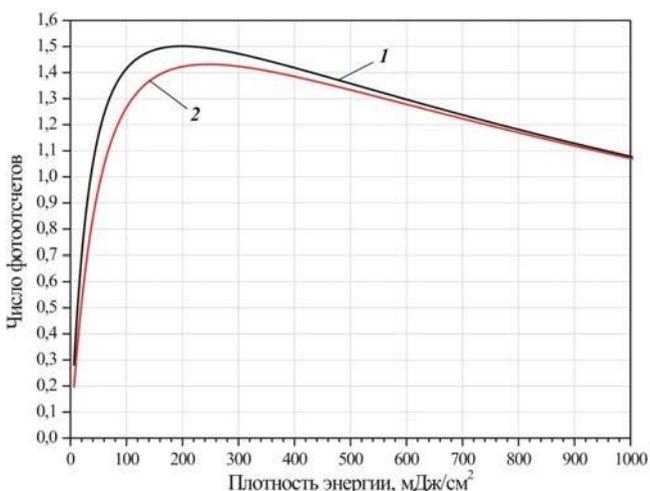


Рисунок 15 – Зависимость суммарного числа фотоотчетов от плотности энергии зондирующего импульса для паров тротила (кривая 1) и гексогена (кривая 2), при вкачивании в исследуемый объем суммарной энергии $W_{\Sigma} = 10$ Дж

На основании полученных данных были сформулированы требования к параметрам аппаратуры лидарного обнаружителя паров азотосодержащих ВВ. Было осуществлено проектирование и изготовление оптико-механической и оптико-электронной систем опытного образца лидарного обнаружителя (рис. 16).

Затем были проведены предварительные и государственные испытания.



Рисунок 16 – Общий вид опытного образца лидарного обнаружителя паров ВВ

В ходе испытаний лидарный обнаружитель надёжно обнаруживал закладки в виде неупакованных тротильных шашек или следовых количеств тротила на поверхности на расстоянии 10–50 м. Лидарный обнаружитель прошёл сертификацию на чувствительность по парам тротила с помощью специальной методики с применением генератора стандартных концентраций ТНТ и показал чувствительность 10^{-12} г/см³.

В заключительной части главы приводятся выводы и рекомендации.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. В рамках предложенного подхода использования единой спектроскопической идеологии и общей технической политики оказалось возможным создание семейства лидарных методов дистанционной диагностики атмосферы, позволяющих решать широкий класс задач дистанционной диагностики состояния окружающей среды.

2. Систематическая ошибка лидарных измерений температуры атмосферы в ближней зоне обусловлена неоднородностью процесса формирования геометрической функции СКР-лидара в спектральных каналах.

3. Гомогенизация структуры оптических сигналов за счёт двойного перемешивания лучей в отрезках моноволоконного световода до и после оптического Фурье преобразования позволяет полностью исключить влияние геометрического фактора лидара на результаты измерения температуры.

4. Наблюдаемое в натурном эксперименте нарушение соотношения интенсивностей полос пространственно разрешенного колебательно-вращательного спектра СКР воды в нижней кромке облака связано с присутствием в облаке молекулярных комплексов воды – водяных кластеров. При этом их концентрация оказывается сравнимой с концентрацией молекул жидкой воды в облаке. Предполагаемое присутствие водяных кластеров затрудняет интерпретацию результатов зондирования и усложняет методику дистанционного определения содержания жидкой воды в атмосфере.

5. Использование суммы лидарных сигналов, соответствующих двум участкам чисто вращательного спектра СКР с противоположными температурными зависимостями их интенсивностей, позволяет исключить влияние температурной стратификации атмосферы на точность определения аэрозольного коэффициента ослабления.

6. Использование импульсной переходной функции системы фоторегистрации лидара позволяет провести процедуру коррекции лидарных откликов на эффект последствия фотодетекторов и устранить аппаратные искажения при определении аэрозольного коэффициента ослабления из лидарных сигналов СКР.

7. Для достижения предельной чувствительности СКР-лидарного газоанализатора необходимо не только подавить линию несмещённого рассеяния, но и обеспечить селективное подавление основных полос спектров СКР на молекулах азота и кислорода. При этом для нормировки сигналов вместо основных полос следует использовать их первые обертоны.

8. При обнаружении паров ВВ на основе ЛФ/ЛИФ метода максимальная чувствительность достигается при использовании оптимальной плотности энергии зондирующего излучения. При длительности импульса 20 нс для паров тротила она составляет 210 мДж/см², а для паров гексогена – 240 мДж/см². Значение оптимальной плотности энергии определяется сечением поглощения паров ВВ на длине волны зондирующего излучения.

9. Чувствительность метода обнаружения нитросоединений на основе одночастотного лазерного фотолиза с последующим возбуждением NO-фрагментов со второго колебательного уровня ограничивается помехами антистоксового спонтанного комбинационного рассеяния на основных газовых компонентах атмосферы (азот, кислород) на уровне 5 ррb. Спектральное разделение Q-ветвей азота и кислорода и полосы флуоресценции NO позволяет радикально устранить этот шумовой фактор и приблизиться к теоретическому пределу чувствительности метода.

10. Повышение плотности мощности в зондирующем лазерном пучке до 10^8 Вт/см² приводит к возникновению шума за счет образования возбужденных молекул NO, N₂ и O₂ из основных компонентов воздуха (O₂, N₂) в результате многофотонных процессов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

Статьи в рецензируемых журналах

1. Yu.Arshinov and S.M.Bobrovnikov "Use of a Fabry-Perot interferometer to isolate pure rotational Raman spectra of diatomic molecules" *Appl. Opt.* 38, 4635–4638 (1999).
2. Ina Mattis, Albert Ansmann, Dietrich Althausen, Volker Jaenisch, Ulla Wandinger, Detlef Müller, Yuri F. Arshinov, Sergej M. Bobrovnikov, and Pya B. Serikov. Relative-humidity profiling in the troposphere with a Raman lidar // *Applied Optics*. 2002. V. 41. № 30. P. 6451–6462.
3. Balin I., Serikov I., Bobrovnikov S., Simeonov V., Calpini B., Arshinov Y., van den Bergh H. Simultaneous measurement of atmospheric temperature, humidity, and aerosol extinction and backscatter coefficients by a combined vibrational–pure-rotational Raman lidar // *Applied Physics B*. 2004. № 79. P. 775–782.
4. Arshinov Yu., Bobrovnikov S, Serikov I, Ansmann A., Wandinger U., Althausen D., Mattis I, and Müller D. Daytime operation of a pure rotational Raman lidar by use of a Fabry-Perot interferometer // *Applied Optics*. 2005. V. 44. № 17. P. 3593–3603.
5. Самохвалов И.В, Бобровников С.М., Гейко П.П., Ельников А.В., Кауль Б.В. Развитие высотного лидара Томского государственного университета как уникального комплекса для мониторинга атмосферы. // *Оптика атмосферы и океана*. 2006. Т. 19, № 11. С. 995–999.
6. Матвиенко Г.Г., Банах В.А., Бобровников С.М., Бурлаков В.Д., Веретенников В.В., Кауль Б.В., Креков Г.М., Маричев В.Н. Развитие технологий зондирования атмосферы // *Оптика атмосферы и океана*. 2009. Т. 22, № 10. С. 915–930.
7. Бобровников С.М., Надеев А.И. Сравнение методов обработки сигнала при дистанционном измерении температуры по чисто вращательным спектрам комбинационного рассеяния // *Оптика атмосферы и океана*. 2010. Т. 23, № 7. С. 580–584.
8. Бобровников С.М., Горлов Е.В., Жарков В.И. Дистанционное обнаружение паров взрывчатых веществ в атмосфере // *Изв. Вузов. Физика*. 2010. № 9/3. С. 32–34.
9. Панченко Ю.Н., Андреев М.В., Бобровников С.М., Горлов Е.В., Дударев В.В., Иванов Н.Г., Лосев В.Ф., Павлинский А.В., Пучикин А.В.,

- Жарков В.И. Узкополосная перестраиваемая лазерная система для лидарного комплекса // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 6. С. 13–18.
10. Бобровников С.М., Горлов Е.В., Жарков В.И. СКР-лидар для мониторинга загрязнений окружающей среды // Изв. вузов. Физика. 2012. № 9/2. С. 279–281.
 11. Бобровников С.М., Горлов Е.В., Жарков В.И. Лидар для обнаружения взрывчатых веществ // Изв. вузов. Физика.–2012.–№9/2. С. 276–279.
 12. Бобровников С.М., Горлов Е.В., Жарков В.И., Панченко Ю.Н. Лидарный обнаружитель паров взрывчатых веществ // Научно-технический портал МВД России. 2012. № 2.
 13. Dinoev T., Simeonov V., Arshinov Y., Bobrovnikov S., Ristori P., Calpini B., Parlange M., and van den Bergh H. Raman Lidar for Meteorological Observations, RALMO – Part 1: Instrument description // Atmospheric Measurement Techniques. 2013. V. 6. P. 1329–1346.
 14. Бобровников С.М., Горлов Е.В., Жарков В.И. Экспериментальная оценка чувствительности СКР-лидара при использовании среднего УФ диапазона длин волн // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 1. С. 70–74.
 15. Бобровников С.М., Горлов Е.В., Жарков В.И., Панченко Ю.Н. Оценка пороговой чувствительности лидарной системы для обнаружения паров нитросоединений // Изв. вузов. Физика. 2013. № 8/3. С. 275–277.
 16. Бобровников С.М., Журавлев А.В., Кихтенко А.В., Тивилева М.И., Горлов Е.В., Жарков В.И., Панченко Ю.Н., Ворожцов А.Б., Сакович Г.В. Оценка пороговой чувствительности лидарного детектора взрывчатых веществ // Научно-технический портал МВД России. 2014. № 1. С. 42–49.
 17. Bobrovnikov S.M., Gorlov E.V., Zharkov V.I., Panchenko Yu.N., Vorozhtsov B., Sakovich G.V. Lidar Facility for the Detection of Explosive Vapors// Propellants Explos. Pyrotech., 2015 (в печати).
- Патентные документы
18. А.с. 702860 СССР, МПК⁵ G01W1/00. Устройство для определения прозрачности атмосферы [Текст] / Аршинов Ю.Ф., Бобровников С.М. (СССР). – № 2584115/18 ; заявл. 01.03.1978 ; опубл. 23.12.1992, Бюл. 47. – 2 с. : ил.
 19. А.с. 1537000 СССР, МПК⁵ G01W1/04. Способ дистанционного определения параметров атмосферы [Текст] / Аршинов Ю.Ф., Бобровников С.М., Волков С.Н. Шумский В.К. (СССР). – № 4307556/10 ; заявл. 22.09.1987 ; опубл. 07.07.1992, Бюл. 25. – 4 с. : ил.
 20. Пат. 75242 Российская Федерация, МКП⁷ G01N 21/64, G02B 27/48. Лазерная система для дистанционного обнаружения взрывчатых веществ / Лосев В.Ф., Бобровников С.М., Ворожцов А.Б., Горлов Е.В.,

Максимов Е.М., Панченко Ю.Н., Резнев А.А., Сакович Г.В., Цаплев Ю.Б., заявитель и патентообладатель Ин-т сильноточной электроники СО РАН. – № 2008110562/22. заявл. 19.03.08, опубл. 27.07.08, Бюл. № 21. – 1 с. : ил.

21. Пат. 123527 Российская Федерация, МКП⁷ G01N 21/64. Лидарная система для дистанционного обнаружения паров взрывчатых веществ в атмосфере / Резнев А.А., Максимов Е.М., Передерий А.Н., Степанов И.В., Сакович Г.В., Бобровников С.М., Ворожцов А.Б., Горлов Е.В., Жарков В.И., Панченко Ю.Н., Максименко Е.В., Павленко А.А., заявитель и патентообладатель РФ, от имени которой выступает ГУ «Войсковая часть 35533». – № 2011153625/28. заявл. 27.12.11, опубл. 27.12.12, Бюл. № 36. – 2 с. : ил.
22. Пат. 134648 Российская Федерация, МКП⁷ G01N 21/65, G01S 17/88. Лидарная система для дистанционного измерения концентраций загрязняющих веществ в атмосфере / Жарков В.И., Бобровников С.М., Горлов Е.В., заявитель и патентообладатель Ин-т оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. – № 2013132226/28. заявл. 11.07.13, опубл. 20.11.13, Бюл. № 32. – 2 с. : ил.
23. Жарков В.И., Бобровников С.М., Горлов Е.В., Патент (Россия). Лидарная система для дистанционного измерения температуры в атмосфере, номер заявки: № 2015106270 от 24 февраля 2015 г.

Монографии

24. I.Serikov, S.Bobrovnikov, Atmospheric temperature profiling with pure rotational Raman lidars, Fiorani L., and Mitev V. Editors, Recent Advances in Atmospheric Lidars, INOE, 149-216, ISBN: 978-973-88109-6-9, 2010.
25. Бобровников С.М., Матвиенко Г.Г., Романовский О.А., Сериков И.Б., Суханов А.Я. Лидарный спектроскопический газоанализ атмосферы // Томск. Изд-во ИОА СО РАН. 2014. 510 с. – ISBN 978-5-94458-148-8.

Статьи в других научных изданиях

26. Bobrovnikov S., Gorlov E., Losev V., Panchenko Yu., Sakovich G., Vorozhtsov A. Stand off detection of explosives vapors using KrF excimer laser radiation // 39th International Annual Conference (Energetic materials - Characterisation, Modelling and Validation), 23–26 June 2008, Karlsruhe, Germany.
27. S. Bobrovnikov, E. Gorlov, Y. Panchenko, G. Sakovich, A. Vorozhtsov, E. Maximov. Lidar Detector of Explosive Vapors // 40th International Annual Conference of ICT (Energetic materials – Characterisation, Modelling and Validation), June 23–26, 2009, Karlsruhe, Germany
28. Bobrovnikov S., Gorlov E., Sakovich G., Vorozhtsov A. LIDAR detection of explosive vapors using excimer laser // Eighth International Symposium

- on Special Topics in Chemical Propulsion “Advancements in energetic materials & chemical propulsion”, November 2–6, 2009. Cape Town, South Africa. P. 129.
29. Bobrovnikov S.M., Gorlov E.V., Zharkov V.I., Panchenko Yu.N. Remote detection of explosive vapors in the air // 25th International Laser Radar Conference, 5–9 July 2010. St.Petersburg, Russia. P. 110–111.
 30. S.M. Bobrovnikov, E.V. Gorlov, G.V. Sakovich, A.B. Vorozhtsov, A.A. Reznov, E.M. Maksimov, A.N. Perederiy, I.V. Stepanov. Stand off Detection of Explosives Vapors in the Atmosphere // 1st EU Conference on the Detection of Explosives, March 14–16, 2011. Avignon, France.
 31. Bobrovnikov S., Gorlov E., Zharkov V., Panchenko Yu., Sakovich G., Vorozhtsov A., Maksimov E. LIDAR detection of explosive vapors in the atmosphere // 8th International High Energy Materials Conference & Exhibit (HEMCE–2011), November 10–12, 2011. Chandigarh, India.
 32. Bobrovnikov S.M., Gorlov E.V., Zharkov V.I. Deep UV Raman-lidar gas analyzer for environmental monitoring // 26th International Laser Radar Conference (ILRC–26), June 25–29, 2012. Porto Heli, Peloponnesus, Greece.
 33. Bobrovnikov S., Gorlov E., Zharkov V., Panchenko Yu., Sakovich G., Vorozhtsov A. Lidar detector of explosive vapors // 2nd European Conference on Detection of Explosives (2nd EUCDE), March 13–15, 2013. Rome, Italy.
 34. Bobrovnikov S., Gorlov E., Zharkov V., Panchenko Yu., Sakovich G., Vorozhtsov A., Maksimov E. Lidar facility for explosive vapors detection // 44th International Annual Conference of the Fraunhofer ITC, June 25–28, 2013. Karlsruhe, Germany.
 35. Bobrovnikov S., Gorlov E., Zharkov V., Panchenko Yu., Sakovich G., Vorozhtsov A., Maksimov E. LIDAR System for Detection of Explosive Vapors // Materials of 9 th International Workshop High Energy Materials (HEMs), 7–9 October 2013. Kanagawa, Japan, PP. 126–127.

Печ. л. 2.
Тираж 100 экз. Заказ № 26.

Тираж отпечатан в типографии ИОА СО РАН.
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1.
Тел. 49-10-93.