

На правах рукописи



Кузовникова Людмила Владимировна

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА
ДИСТАНЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ
СЛЕДОВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТОВ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИК-ДИАПАЗОНА**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН).

Научный руководитель: **Ворожцов Александр Борисович**, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные
оппоненты: **Максимов Евгений Михайлович**, доктор технических наук, Федеральное государственное казенное учреждение «Войсковая часть 35533», старший научный сотрудник

Грузнов Владимир Матвеевич, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), главный научный сотрудник лаборатории полевых аналитических и измерительных технологий

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН)

Защита состоится 25 декабря 2018 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 53а и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>.

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Шевелева Елена Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы. Проблема оперативного обнаружения и идентификации ВВ и ВУ является достаточно актуальной. Большинство из существующих на сегодняшний день методов и средств обнаружения ВВ требуют непосредственного контакта с объектом исследования, что не всегда является возможным. В связи с этим дистанционному детектированию следов (твердых частиц) и паров, находящихся в тех или иных количествах вблизи или на поверхности ВУ, уделяется повышенное внимание.

Сегодня принципиальной возможностью дистанционных измерений (более 10 м) обладают только оптические (лазерные) методы обнаружения паров и следов конденсированного ВВ, поэтому именно они в большей степени вызывают исследовательский интерес. Применение средств для обнаружения ВВ в паровой фазе на базе оптических методов крайне осложнено низким уровнем концентрации паров ВВ в атмосфере ввиду их низкой летучести. Поэтому наибольший интерес представляют дистанционные методы обнаружения следовых количеств конденсированного ВВ на поверхности различных объектов и на теле человека.

Одним из новых, перспективных и менее изученных оптических методов является метод активного формирования спектральных изображений (АФСИ), позволяющий дистанционно обнаруживать следовые количества веществ.

Автоматизация процесса регистрации и идентификации типа ВВ позволит сократить время проведения досмотра и снизит требования, предъявляемые к оператору.

Целью диссертационной работы является разработка комплекса и исследование метода дистанционного обнаружения и идентификации следов взрывчатых веществ на поверхности объектов при воздействии лазерного излучения ИК-диапазона.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

- проанализировать существующие методы и технические средства для обнаружения следовых количеств ВВ. Провести анализ применимости метода АФСИ для дистанционного обнаружения следов конденсированных ВВ на поверхности;
- определить необходимые технические характеристики оборудования для создания комплекса;
- автоматизировать работу аппаратуры комплекса дистанционного обнаружения и идентификации следов ВВ;
- экспериментально оценить эффективность обнаружения следов ВВ в реальных условиях и подтвердить технические характеристики разработанного комплекса;
- разработать практические рекомендации по улучшению характеристик комплекса.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые реализован метод АФСИ в измерительном комплексе с использованием перестраиваемого CO_2 -лазера и неохлаждаемой микроболометрической камеры, позволяющий дистанционно и скрытно детектировать следы конденсированных ВВ с поверхностной концентрацией: $0,2 \text{ мг/см}^2$ – для октогена; $0,9 \text{ мг/см}^2$ – для гексогена; $0,35 \text{ мг/см}^2$ – для ТНТ и $0,5 \text{ мг/см}^2$ – для ТЭНа.

2. Впервые выполнена обработка гиперспектральных данных для идентификации ВВ, заключающаяся в использовании метода минимального расстояния и метода спектрального угла.

3. Разработана методика дистанционного обнаружения следов конденсированных ВВ методом АФСИ с учетом типа ВВ и подложки, условий окружающей среды и параметров измерительного комплекса.

Практическая значимость работы:

1. Разработанный измерительный комплекс обеспечивает дистанционное обнаружение и идентификацию ВВ на поверхности тел со следующими характеристиками: вероятность обнаружения ВВ более 88,7 %, предел обнаружения ВВ менее $0,84 \text{ мг/см}^2$, время обнаружения не более 6 мин, дистанция обнаружения не менее 0,5 м.

2. Разработано ПО, позволяющее автоматизировать процессы управления характеристиками перестраиваемого CO_2 -лазера (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015613911), регистрации и обработки гиперспектрального куба данных, а также идентификации типа ВВ и вывода полученных результатов о наличии следов ВВ.

3. Создана собственная библиотека ИК-спектров поглощения следовых количеств реальных ВВ (октоген, гексоген, ТНТ, ТЭН) с возможностью ее дополнения.

Достоверность результатов диссертации, полученных в работе, обеспечивается применением современных методов исследования, сертифицированной измерительной аппаратуры, современных программных средств, а также большим объемом полученных экспериментальных данных. Достоверность результатов обнаружения удовлетворительно подтверждается соответствием расчетных и экспериментальных данных.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод АФСИ для дистанционного обнаружения и идентификации следов ВВ, основанный на формировании и анализе набора пространственно-спектральных изображений (гиперспектральный куб данных), получаемого в результате регистрации многоэлементным приёмником диффузно рассеянного исследуемой поверхностью излучения при её облучении перестраиваемым источником лазерного излучения с узкой полосой генерации.

2. Оптико-электронный комплекс дистанционного обнаружения следов ВВ, реализованный на основе метода АФСИ с использованием

перестраиваемого CO₂-лазера и микроболометрической камеры с многоэлементной матрицей.

3. Автоматизация процессов регистрации и обработки гиперспектрального куба данных, а также идентификация типа ВВ и вывод полученных результатов о наличии следов ВВ.

4. Основные технические характеристики оптико-электронного комплекса по обнаружению следов ВВ.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы изложены в 11 научных трудах, из которых 4 статьи опубликованы в журналах рекомендуемых ВАК и одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Апробация результатов исследований.

Основные положения и научные результаты диссертационной работы докладывались и получили положительную оценку на XI и XII Всероссийской научно-технической конференция «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях ИАМП-2014, ИАМП-2017» (г. Бийск, 2014, 2017), V и VII Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых «Перспективы создания и применения конденсированных высокоэнергетических материалов» (г. Бийск, 2014, 2018), 16th и 17th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electronic Devices «EDM 2015» и «EDM 2016» (Erlagol, Altai, 2015, 2016), The 6th International Symposium on Energetic Materials and their Applications (ISEM2017) (Tohoku University, Sendai, Miyagi Prefecture, Japan, 2017).

Личный вклад автора заключался в анализе литературных данных, выборе оборудования и создании комплекса, разработке ПО, проведении экспериментов, обработке полученных данных. Диссертант принимал непосредственное участие в подготовке публикаций, научных статей и докладов на конференциях.

Объём и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 133 страницах машинописного текста, включая 4 таблицы и 84 рисунка. Список литературы включает 118 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, состояние проблемы, сформулированы цель работы и задачи исследований, представлены используемые методы исследования и определены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор оптических методов дистанционного обнаружения ВВ в виде следов и имеющихся средств диагностики ВВ. Выяснено, что все установки, существующие на сегодняшний момент, находятся в виде экспериментальных образцов.

Определено, что среди существующих методов дистанционного обнаружения ВВ, наиболее перспективными являются методы

фототермической спектроскопии и метод активного формирования спектральных изображений (АФСИ), поскольку разработанные на их основе комплексы обладают следующими основными достоинствами: реальная дистанционность и неразрушающий характер исследования; скрытое сканирование; безопасность для людей и багажа; сканирование большой пространственной области; идентификация широкого класса опасных веществ.

На основании проведенного анализа, для детектирования следовых количеств ВВ предлагается разработка оптико-электронного измерительного комплекса на базе метода АФСИ с использованием перестраиваемого источника лазерного излучения.

Вторая глава посвящена теоретическим методам исследования основ метода АФСИ с целью создания работоспособного измерительного комплекса.

Проведен обзор спектральных областей пригодных для дистанционного исследования и выбрана ИК-область в диапазоне от 8 до 14 мкм в качестве рабочей, исходя из спектральных особенностей ВВ и окон прозрачности атмосферы, безопасности для человека и возможности скрытного досмотра.

Для исследования технических характеристик разработанного измерительного комплекса был выбран перечень веществ: по фазе вещества и чувствительности к лазерному излучению – гексоген, октоген, ТНТ и ТЭН, а для тестирования ложных срабатываний и селективности – мыло, сахарная пудра и оксид алюминия (Al_2O_3).

В качестве подложек выбраны материалы, по-разному взаимодействующие с лазерным излучением и вносящие различную по интенсивности шумовую составляющую – искусственная кожа, стекло и фанера.

Выполнен обзор методов и средств получения тестовых образцов (подложка + исследуемое вещество) с известными поверхностными концентрациями. Для создания тестовых образцов выбраны микропипетирование и взвешивание, которые имеют преимущество в отсутствии дорогостоящего оборудования и простоте изготовления образцов.

Также проанализированы методы обработки и идентификации гиперспектральных данных. Обоснована необходимость обработки спектральных изображений: уменьшение спекл-шума, вычитание фонового изображения, компенсацию мощности излучения, идентификацию области лазерного воздействия.

Выбраны два попиксельных метода анализа гиперспектральных данных как наиболее простые и быстродейственные – метод минимального расстояния (1):

$$r = \sqrt{\sum_{k=1}^k (\vec{f}_{nk} - \vec{f}_{ijk})^2} \quad (1)$$

и метод спектрального угла (2):

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^k \vec{f}_{ijk} \cdot \vec{f}_{nk}}{\left(\sum_{k=1}^k \vec{f}_{ijk}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\sum_{k=1}^k \vec{f}_{nk}^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \right), \quad (2)$$

где $(\vec{f}_n)$ – эталонный спектр, $(\vec{f}_{ij})$ – вектор значений яркости пикселя снимка, k — общее число используемых каналов.

Третья глава посвящена выбору необходимого оборудования, оптических элементов и созданию оптико-электронного комплекса.

Определен состав и структура технических средств комплекса, продумана и выполнена автоматизация. Структурная схема измерительного комплекса приведена на рисунке 1.

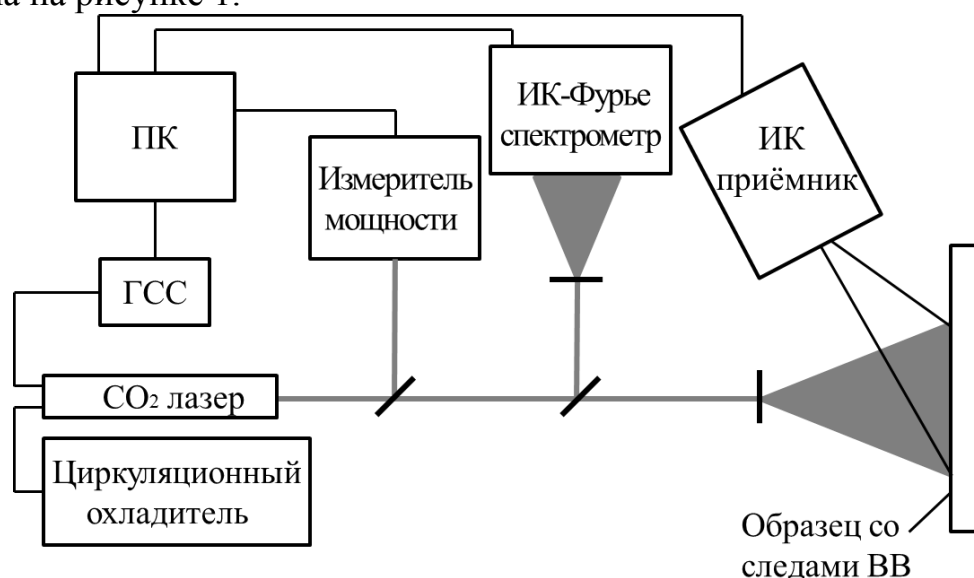


Рисунок 1 – Структурная схема измерительного комплекса

В разработанный оптико-электронный комплекс вошли:

- источник лазерного излучения (CO₂-лазер) LCD-5WGT, необходимый для облучения исследуемой поверхности.
- серворегулятор MR-J2S-10 CL совместно со встроенным в излучатель сервомотором Mitsubishi Electric HC-MFS053, предназначенный для перестройки длины волны лазера в диапазоне от 9,2 до 10,8 мкм.
- циркуляционный охладитель LAUDA WK 2200, обеспечивающий принудительное охлаждение излучателя и источника питания.
- генератор сигналов специальной формы ГСС-40, позволяющий управлять генерацией излучения.
- измеритель мощности UP19K-30H-H5-D0 фирмы Gentec-EO, служащий для измерения мощности источника.
- ИК-Фурье спектрометр «Инфралюм ФТ-801» необходимый для определения длины волны лазерного излучения.

– передающая оптическая система, разделяющая поток лазерного излучения для измерения параметров самого излучения и рассеивающая его на объект регистрации.

– ИК-приёмник – неохлаждаемая микроболометрическая камера Gobi-384 для регистрации изображения подсвеченной лазером поверхности.

Излучение перестраиваемого ИК-лазера LCD-5WGT разделяется светоделительными пластинами для оценки характеристик излучения и рассеивается линзой для подсветки объекта со следами исследуемого вещества на поверхности. Рассеянное поверхностью излучение регистрируется камерой.

Лазер перестраивается в диапазоне, содержащем полосы поглощения известных ВВ. Полученные данные анализируются выбранными методами. Эталонные ИК-спектры ВВ, используемые при анализе результатов обнаружения, были собраны в библиотеку.

ПО для автоматизации измерительного комплекса с использованием ПК разработано в среде программирования Python и состоит из трех модулей.

1) Модуль определения характеристик лазерного излучения, необходимый для непрерывного или периодического контроля корректной работы лазера в автоматическом режиме формирует калибровочный файл с параметрами лазерного излучения (коэффициент заполнения сигнала управления, мощность излучения, длина волны линий излучения).

Проведенные измерения выявили 56 рабочих длин волн.

2) Модуль автоматической регистрации спектральных изображений подсвечиваемой поверхности формирует два гиперкуба «активного» и «пассивного» кадров, содержащих 56 спектральных каналов в диапазоне от 9,18 до 10,81 мкм.

3) Модуль обработки и интерпретации гиперспектральных данных осуществляющий: определение области лазерного воздействия с получением разностных изображений «активного» и «пассивного» кадров и выделением пересечения области лазерного пятна на всех длинах волн при сравнении с пороговым значением (собственный шум камеры). Экспериментально выявлено максимальное значение среднеквадратического отклонения значений тепловых шумов равное 150 отн. ед. яркости.

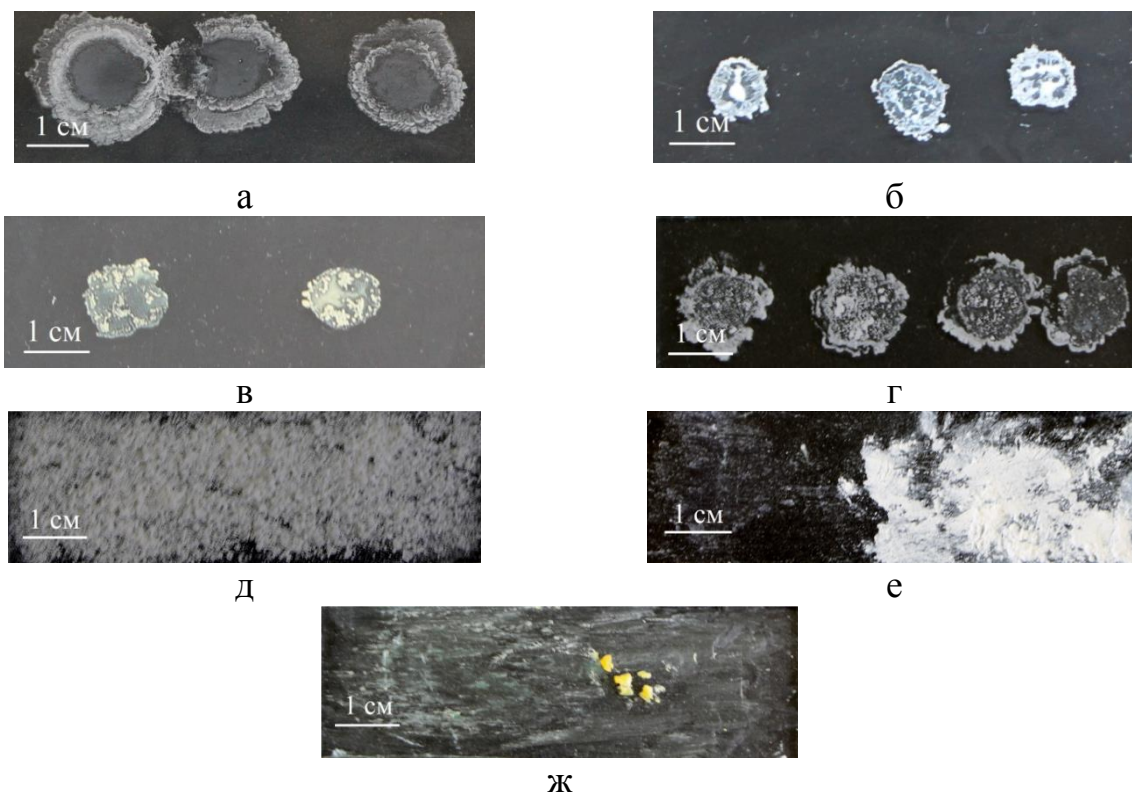
Подавление спекл-шума осуществляется медианной фильтрацией с областью сглаживания 8x8 пикселей. В ходе экспериментов и при расчете спектральной плотности мощности шума путем преобразования Фурье выявлено, что фильтрация снижает высокочастотную составляющую мощности шума в 40 раз.

Модуль реализует два метода идентификации веществ – метод спектрального угла и метод минимального расстояния. Дополнительно реализована графическая индикация факта обнаружения следов ВВ на исследуемой поверхности.

Каждый из выше описанных модулей может выполняться, как самостоятельная программа, так и в составе единого программного комплекса.

Для проверки работоспособности измерительного комплекса и определения его характеристик были изготовлены тестовые образцы из ранее выбранных анализируемых веществ и разделены на три группы в зависимости от материалов-подложек.

Образцы первой группы были выполнены на подложке из стекла. Внешний вид образцов представлен на рисунке 2. Образцы рисунок 2 а-г изготавливались способом микропипетирования, а остальные методом взвешивания.



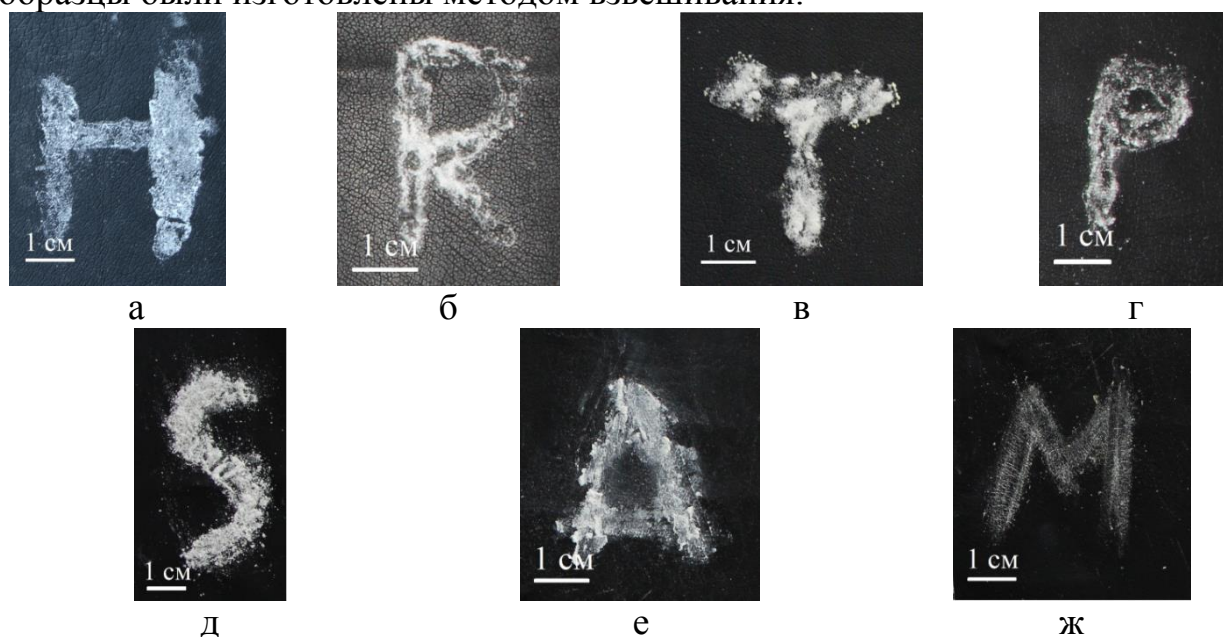
а – образец №1-1 (октоген); б – образец №1-2 (гексоген); в – образец №1-3 (ТНТ); г – образец №1-4 (ТЭН); д – образец №1-5 (сахарная пудра); е – образец №1-6 (Al_2O_3); ж – образец №1-7 (мыло)

Рисунок 2 – Первая группа тестовых образцов на стекле

В образце №1-1 следы октогена сформировались в виде трех колец с поверхностной концентрацией – 1,7, 1,2 и 0,85 мг/см^2 соответственно. Следы гексогена в образце №1-2 представляют собой три пятна, поверхностная концентрация которых 1, 0,64 и 0,8 мг/см^2 . Образец №1-3 представляет собой два сформировавшихся пятна ТНТ с поверхностной концентрацией – 0,64 и 0,78 мг/см^2 соответственно. Образец №1-4 представляет четыре близко расположенных пятна ТЭНа с поверхностной концентрацией – 1,1, 1,3, 0,85 и 0,75 мг/см^2 соответственно. Образец №1-5 – равномерно распределенная по поверхности предметного стекла сахарная пудра со средней поверхностной концентрацией 2,6 мг/см^2 . Образец №1-6 – распределенный до середины стекла Al_2O_3 со средней поверхностной концентрацией 1,9 мг/см^2 . Образец №1-7 – распределенное по поверхности стекла мыло с несколькими крупными

частицами. Средняя поверхностная концентрация без учета крупных частиц составила 2,1 мг/см².

Подложкой во второй группе образцов служила искусственная кожа. Внешний вид тестовых образцов второй группы приведен на рисунке 3. Все образцы были изготовлены методом взвешивания.



а – образец №2-1 (октоген); б – образец №2-2 (гексоген); в – образец №2-3 (ТНТ); г – образец №2-4 (ТЭН); д – образец №2-5 (сахарная пудра); е – образец №2-6 (Al₂O₃); ж – образец №2-7 (мыло)

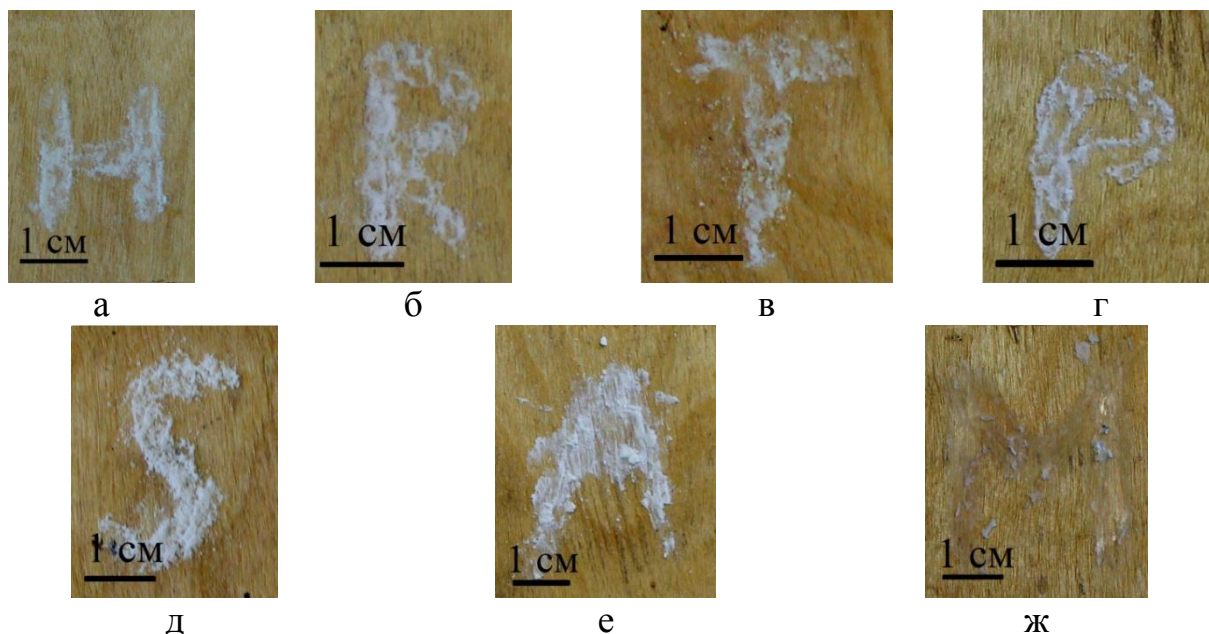
Рисунок 3 – Вторая группа тестовых образцов на подложке из искусственной кожи

Образцы выполнены в виде букв. Поверхностная концентрация октогена на образце №2-1 (буква «Н») составила 2,4 мг/см², гексогена на образце №2-2 (буква «R») – 2,85 мг/см², ТНТ на образце №2-3 (буква «Т») – 3,2 мг/см², ТЭНа на образце №2-4 (буква «Р») – 2,3 мг/см², сахарной пудры на образце №2-5 (буква «S») – 3 мг/см², Al₂O₃ на образце №2-6 (буква «A») – 2,5 мг/см², мыла на образце №2-7 (буквы «M») – 2 мг/см².

Третья группа. Подложка – фанера.

Все образцы третьей группы изготавливались способом взвешивания. Изготовленные на подложке из фанеры образцы были выполнены в виде букв, как и образцы второй группы. Внешний вид тестовых образцов третьей группы приведен на рисунке 4.

Поверхностная концентрация октогена на образце №3-1 составила 2,6 мг/см², гексогена на образце №3-2 – 3 мг/см², ТНТ на образце №3-3 – 2,1 мг/см², ТЭНа на образце №3-4 – 2,8 мг/см², сахарной пудры на образце №3-5 – 3,54 мг/см², Al₂O₃ на образце №3-6 – 2,57 мг/см², мыла на образце №3-7 – 2,9 мг/см².



а – образец №3-1 (октоген); б – образец №3-2 (гексоген); в – образец №3-3 (ТНТ); г – образец №3-4 (ТЭН); д – образец №3-5 (сахарная пудра); е – образец №3-6 (Al_2O_3); ж – образец №3-7 (мыло)

Рисунок 4 – Третья группа тестовых образцов на подложке из фанеры

В качестве контрольных образцов, необходимых для выявления ложноположительных срабатываний, выбраны чистые подложки без каких-либо следовых количеств веществ.

Для экспериментального исследования обнаружения и идентификации ВВ разработана следующая методика выполнения измерений.

1. Предварительная проверка работоспособности оптико-электронного комплекса (установление рабочих длин волн и мощности лазерного излучения на каждой длине волны при помощи созданной программы автоматического определения характеристик CO_2 -лазера).

2. Установка тестового образца в области воздействия лазерного излучения.

3. Регистрация гиперспектрального куба данных на 56 длинах волн лазерного излучения.

4. Обработка и анализ зарегистрированного спектрального гиперкуба.

5. Выдача результатов в виде зарегистрированного спектрального изображения с выделением цветом идентифицированного вида ВВ (белый цвет – октоген, красный – гексоген, зеленый – ТНТ, синий – ТЭН, фиолетовый – вид ВВ неопределен) и количеством занимаемых им пикселей.

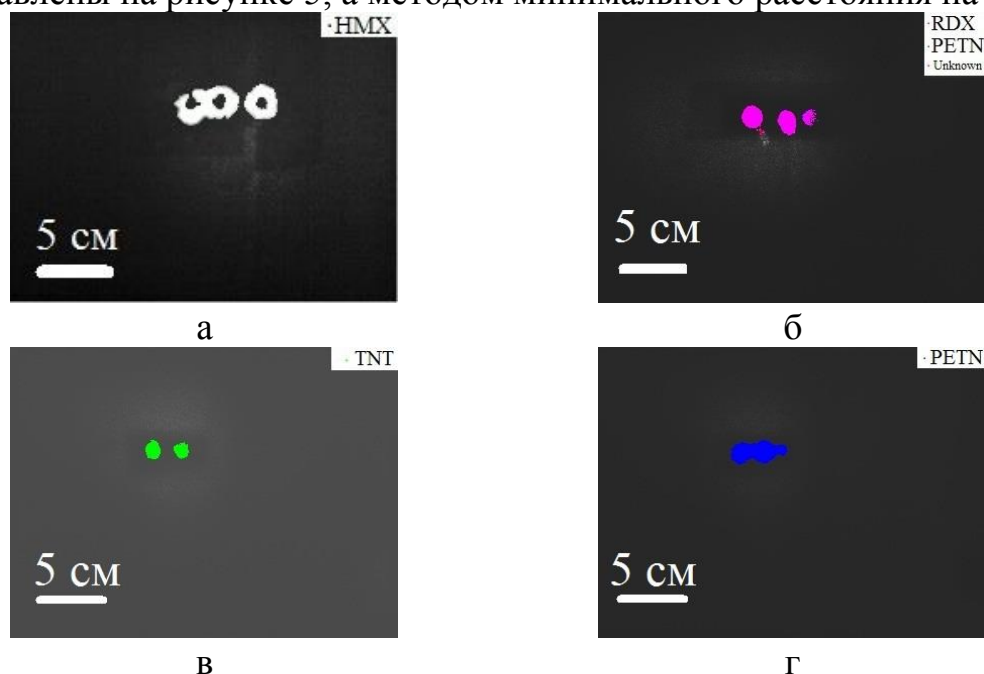
6. Повторение действий с пункта 2 по пункт 5 для различных тестовых образцов.

В четвертой главе рядом экспериментов была подтверждена возможность использования разработанного измерительного комплекса для проведения дистанционной автоматической идентификации следов ВВ.

Исследование работоспособности комплекса и определение его характеристик проводилось на 30 тестовых образцах. Полный цикл исследования с каждым образцом выполнялся по 20 раз с изменением пространственного положения образца относительно исследуемой сцены. Все тестовые образцы располагались на расстоянии 0,5 м от приёмника излучения.

При сравнении полученных спектров с эталонным из библиотеки, было экспериментально подобрано пороговое значение, ниже которого вещество идентифицируется как взрывчатое. Установлено, что при отклонении полученного спектра от эталонного менее чем на 20%, пиксель изображения принимается как ВВ и окрашивается в соответствующий цвет. В случае, если полученный спектр соответствует нескольким эталонным спектрам ВВ, то ВВ обнаружено, но не идентифицировано.

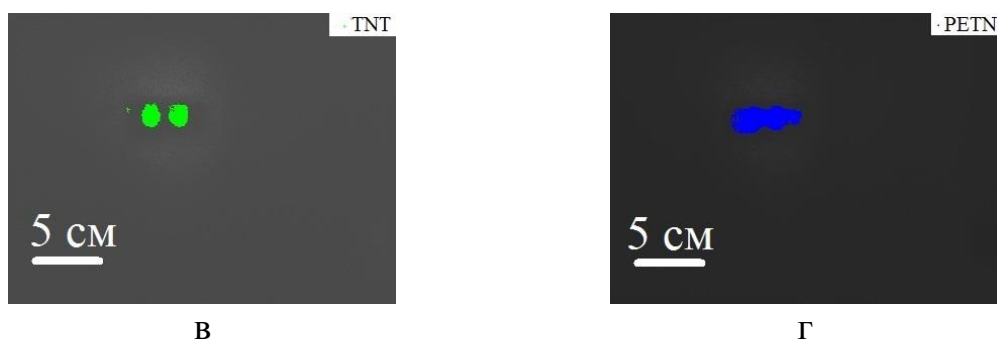
В первой серии была проанализирована первая группа тестовых образцов на подложке из стекла. Результаты идентификации методом спектрального угла представлены на рисунке 5, а методом минимального расстояния на рисунке 6.



а – образец №1-1 (октоген); б – образец №1-2 (гексоген); в – образец №1-3 (ТНТ); г – образец №1-4 (ТЭН)

Рисунок 5 – Результат анализа тестовых образцов первой группы методом спектрального угла





а – образец №1-1 (октоген); б – образец №1-2 (гексоген); в – образец №1-3 (ТНТ); г – образец №1-4 (ТЭН)

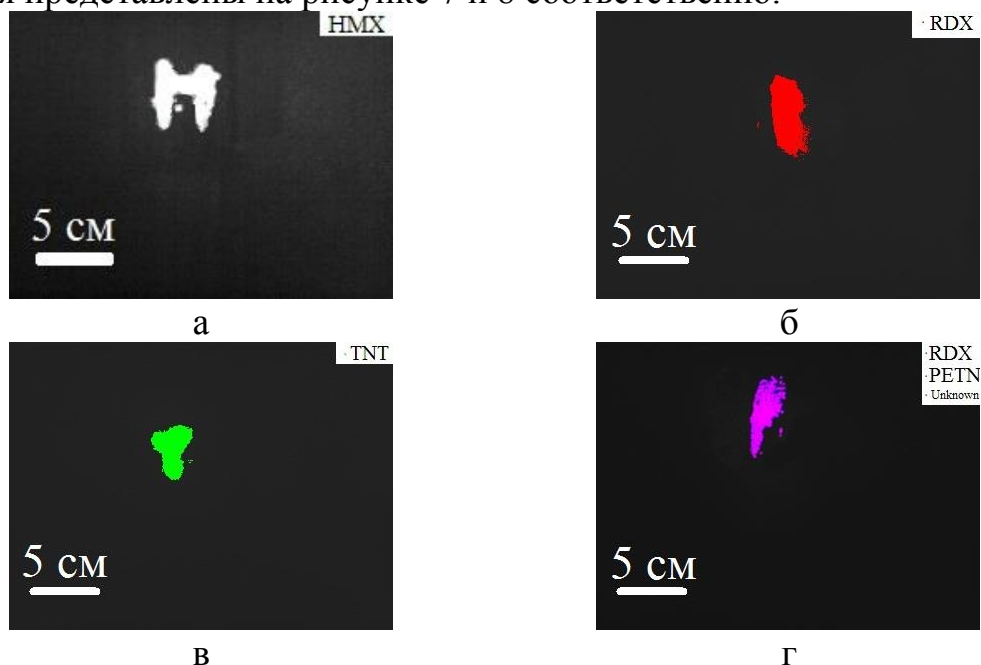
Рисунок 6 – Результат анализа тестовых образцов первой группы методом минимального расстояния

В данной серии опытов следы октогена (№1-1) были обнаружены с вероятностью 95 %. В случае с гексогеном (№1-2) выявлено место нанесения следов в 90 % случаев, из которых в 11 % случаев не определен тип ВВ. Местоположение ТНТ (№1-3) и ТЭНа (№1-4) было определено с 95 % вероятностью.

Также была проведена идентификация следов веществ не обладающих взрывной способностью (образцы №1-5-№1-7), показавшая отсутствие ложноположительных срабатываний.

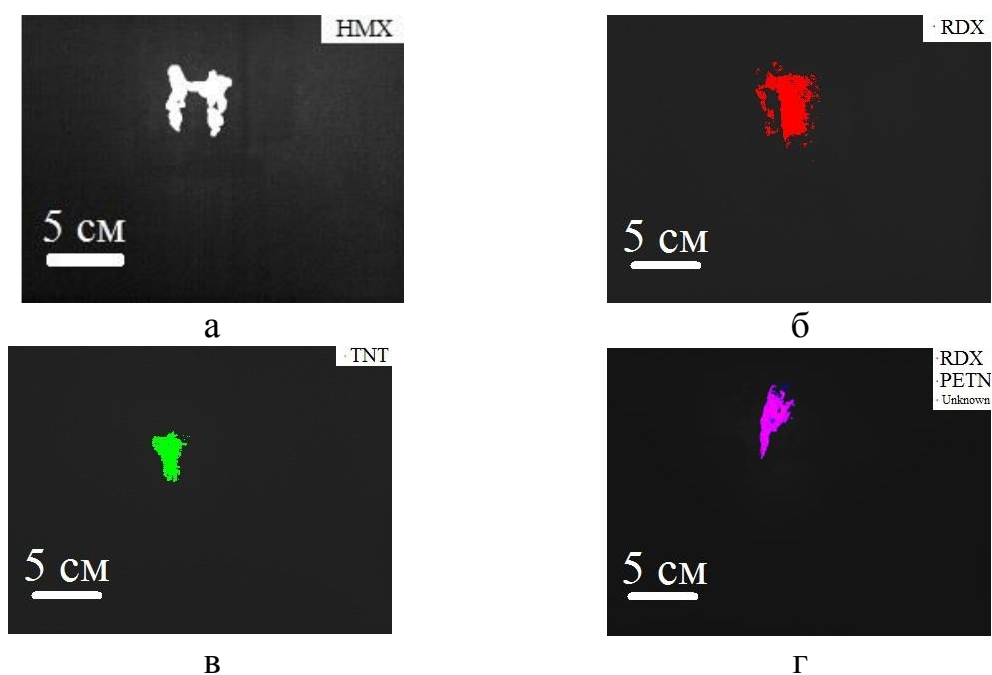
Вторая серия экспериментов проводилась на подложке из искусственной кожи.

Результаты обработки зарегистрированных образцов двумя методами сравнения представлены на рисунке 7 и 8 соответственно.



а – образец №2-1 (октоген); б – образец №2-2 (гексоген); в – образец №2-3 (ТНТ); г – образец №2-4 (ТЭН)

Рисунок 7 – Результат анализа тестовых образцов второй группы методом спектрального угла



а – образец №2-1 (октоген); б – образец №2-2 (гексоген); в – образец №2-3 (ТНТ); г – образец №2-4 (ТЭН)

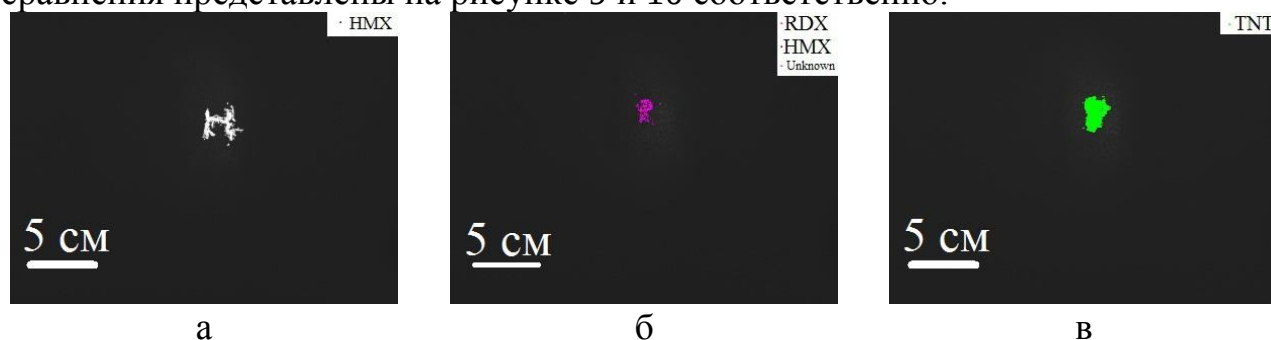
Рисунок 8 – Результат анализа тестовых образцов второй группы методом минимального расстояния

Образец с октогеном (№2-1) был обнаружен в 90 % случаев, а гексоген (№2-2) – в 85 %. В экспериментах с образцом ТНТ (№2-3) ВВ верно идентифицировано и локализовано с 90 % вероятностью. Образец ТЭНа (№2-4) обнаружен в 85 % экспериментов, из которых не идентифицирован в 18 %.

Как и в экспериментах с первой группой, результаты обработки образцов №2-5–№2-7 не дали ложноположительных срабатываний.

Третья серия экспериментов проводилась с образцами на подложке из фанеры.

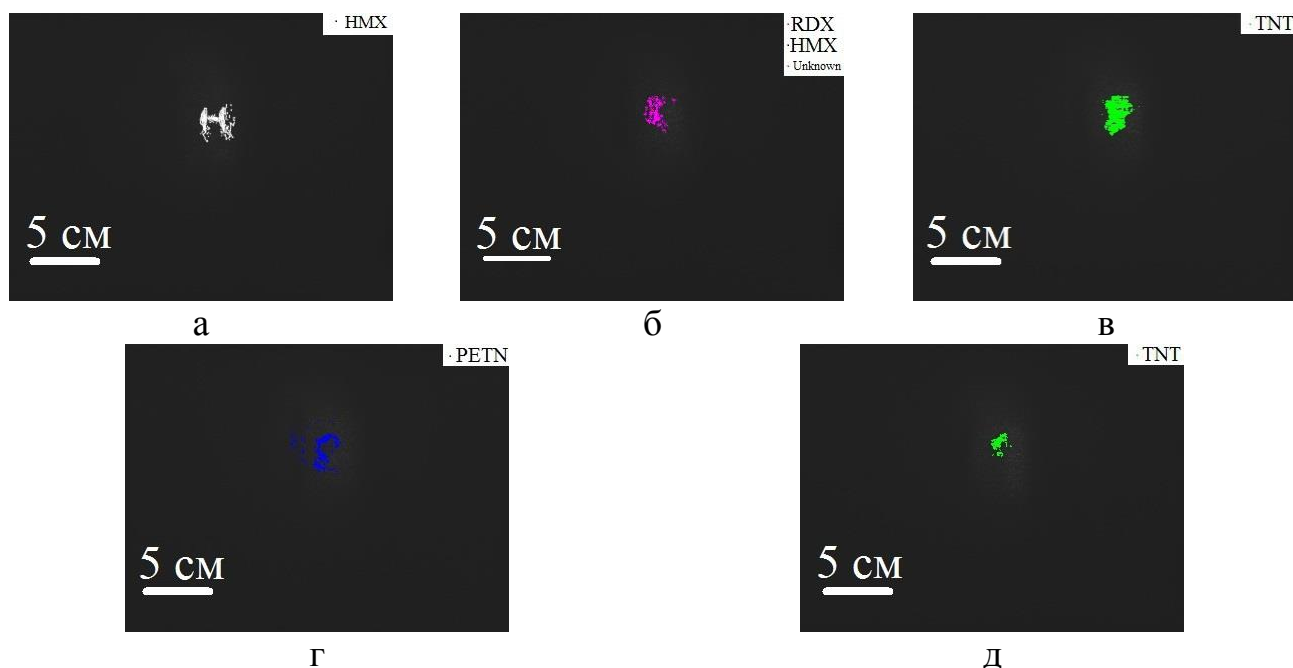
Результаты обработки зарегистрированных образцов двумя методами сравнения представлены на рисунке 9 и 10 соответственно.





а – образец №3-1 (октоген); б – образец №3-2 (гексоген); в – образец №3-3 (ТНТ); г – образец №3-4 (ТЭН); д – образец №3-5 (сахарная пудра)

Рисунок 9 – Результат анализа тестовых образцов третьей группы методом спектрального угла



а – образец №3-1 (октоген); б – образец №3-2 (гексоген); в – образец №3-3 (ТНТ); г – образец №3-4 (ТЭН), д – образец №3-5 (сахарная пудра)

Рисунок 10 – Результат анализа тестовых образцов третьей группы методом минимального расстояния

Местоположение образцов октогена (№3-1) и гексогена (№3-2) обнаружено в 90 и 85 % экспериментов, из которых вид ВВ не идентифицирован в 6 % и 18 % соответственно. В экспериментах с ТНТ (№3-3) и ТЭНом (№3-4) местоположение локализовано с 85 и 80 % вероятностью, из которых вид ВВ не идентифицирован в 12 и 19 % экспериментов соответственно.

В экспериментах с взрывобезопасными веществами образец №3-5 (сахарная пудра) был ошибочно идентифицирован как тротил в 10 % случаев. На остальных образцах №3-6 и №3-7 ложные тревоги отсутствовали.

Различие в количестве обнаруженных пикселей двумя методами не превысило 10 %.

Как следует из результатов экспериментов и анализа рисунков различных уровней яркости ПИ не повлияет на результаты детектирования. Это объясняется выполнением нормировки яркости пикселей всех спектральных изображений, входящих в гиперкуб данных.

В заключительной части главы конкретизированы основные технические характеристики, предъявляемые к измерительному комплексу в задачах дистанционного зондирования, и предложены рекомендации по их оптимизации.

1. Вероятность обнаружения (P) – параметр, характеризующий отношение числа верных срабатываний к общему числу проводимых измерений.

На основе экспериментальных данных была определена вероятность обнаружения следовых количеств искомых ВВ, результаты которой приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Вероятность обнаружения ВВ на базе разработанного измерительного комплекса.

Подложка \ ВВ	Октоген, %	Гексоген, %	ТНТ, %	ТЭН, %	$P_{\text{ср. обнар.}}$, %
Стекло	95	90	95	95	94
Искусственная кожа	90	85	90	85	87
Фанера	90	85	85	80	85
$P_{\text{ср. обнар.}}$, %	92	87	90	86,7	89

Самая высокая вероятность обнаружения ВВ на подложке из стекла, при этом самым обнаруживаемым ВВ является октоген. В среднем вероятность обнаружения ВВ составила 89 %.

2. Вероятность идентификации – параметр, характеризующий отношение числа верных идентификаций к общему числу верных обнаружений.

Составлена таблица 2 вероятности идентификации типа ВВ в случае подтверждения факта обнаружения на базе разработанного измерительного комплекса.

Таблица 2 – Вероятность идентификации типа ВВ в случае подтверждения факта обнаружения на базе разработанного измерительного комплекса.

Подложка \ ВВ	Октоген, %	Гексоген, %	ТНТ, %	ТЭН, %	$P_{\text{ср. идент.}}$, %
Стекло	100	89	100	95	96
Искусственная кожа	100	88	100	82	92
Фанера	94	82	88	81	86
$P_{\text{ср. идент.}}$, %	98	86	96	86	91

Лучше всех был идентифицирован октоген. В среднем вероятность идентификации в случае обнаружения составила 91 %.

3. Предел обнаружения ($c_{\min}$) измерительного комплекса дистанционного обнаружения ВВ – это минимальная поверхностная концентрация ВВ, которая при взаимодействии с лазерным излучением вызывает отклик, достаточный для регистрации и извлечения из него информации о наличии следов искомого вещества.

Был проведен теоретический расчет предела обнаружения октогена, который для данной компоновки комплекса составил $0,2 \text{ мг/см}^2$.

Экспериментально предел обнаружения исследовался на следах четырех ВВ. Следовые количества ВВ на стеклянной подложке и подложке из искусственной кожи были нанесены методом микропипетирования с шагом 10 мкл. Нанести ВВ методом микропипетирования на подложку из фанеры не удалось. Поэтому для данных образцов применялся метод взвешивания.

Результаты экспериментов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Предел обнаружения ВВ на базе разработанного измерительного комплекса

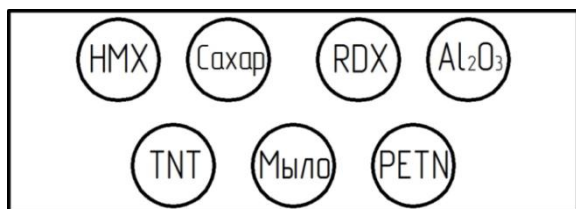
Подложка \ ВВ	Октоген, мг/см^2	Гексоген, мг/см^2	ТНТ, мг/см^2	ТЭН, мг/см^2	$c_{\min}$, мг/см^2
Стекло	0,2	0,44	0,35	0,5	0,37
Искусственная кожа	0,7	0,9	0,7	0,85	0,79
Фанера	1,4	1,3	1,2	1,5	1,35
$c_{\min}$, мг/см^2	0,77	0,88	0,75	0,95	0,84

Самый малый предел обнаружения на подложке из стекла, который в среднем составил $0,37 \text{ мг/см}^2$, при этом из всех ВВ октоген идентифицировался с поверхностной концентрацией равной $0,2 \text{ мг/см}^2$. В среднем предел обнаружения ВВ составил $0,84 \text{ мг/см}^2$.

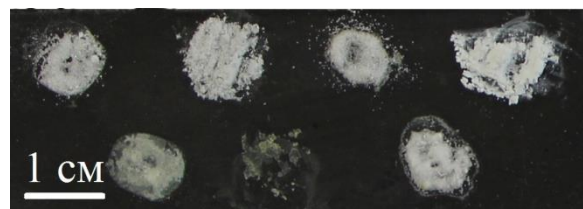
Уменьшить предел обнаружения возможно путем замены ИК-камеры на камеру с более высоким разрешением и более высокой чувствительностью, снижения шумов камеры за счёт охлаждения, изготовления тестовых образцов с меньшей поверхностной концентрацией, а также применения субпиксельных алгоритмов анализа гиперспектральных данных.

4. Селективность (избирательность) – возможность выделения и идентификации какого-то вещества в присутствии других.

Проведены экспериментальные исследования по определению селективности измерительного комплекса. Вещества (октоген, гексоген, ТНТ, ТЭН, сахарная пудра, Al_2O_3 , мыло) были одновременно нанесены на три вида подложек. Схемы нанесения веществ и их расположение в сцене, а также внешний вид полученных образцов, нанесенных на различные поверхности, представлены на рисунке 11.



а



б



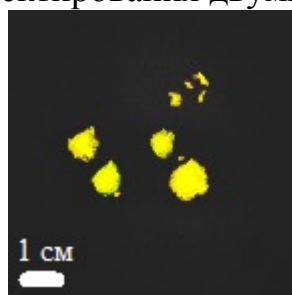
в



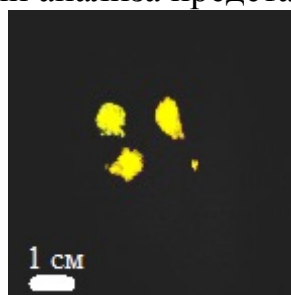
г

а – схема нанесения веществ; б – подложка – стекло; в – подложка – искусственная кожа; г – подложка – фанера
Рисунок 11 – Схема нанесения и внешний вид образцов для проверки селективности измерительного комплекса

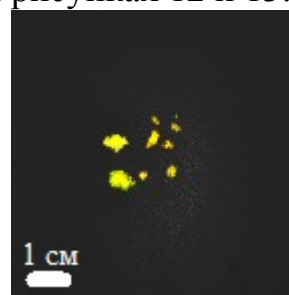
Результаты экспериментального исследования при обработке результатов детектирования двумя методами анализа представлены на рисунках 12 и 13.



а



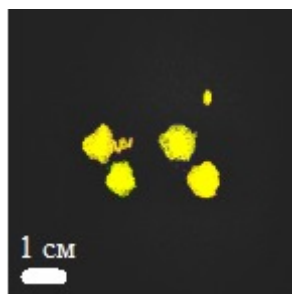
б



в

а – подложка – стекло; б – подложка – искусственная кожа;
в – подложка – фанера;

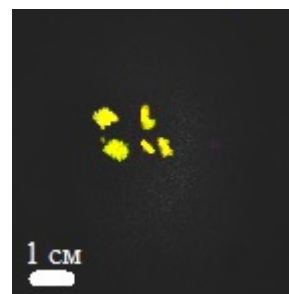
Рисунок 12 – Результат анализа тестовых образцов методом спектрального угла



а



б



в

а – подложка – стекло; б – подложка – искусственная кожа;
в – подложка – фанера;

Рисунок 13 – Результат анализа тестовых образцов методом минимального расстояния

Комплекс показал достаточно высокую селективность селективность при классификации взрывчатых и взрывобезопасных веществ.

Дальность обнаружения (дистанционность) – максимальное расстояние, на котором с помощью комплекса можно обнаружить и идентифицировать объект (цель) и определить его координаты с требуемой точностью.

В связи с использованием попиксельного анализа гиперкуба достоверное обнаружение и идентификация вещества разработанным измерительным комплексом возможны в случае, если вещество занимает как минимум один пиксель. На рисунке 14 представлен график зависимости минимальной площади объекта, проецируемого на один пиксель матрицы микроболометрической камеры, от расстояния.

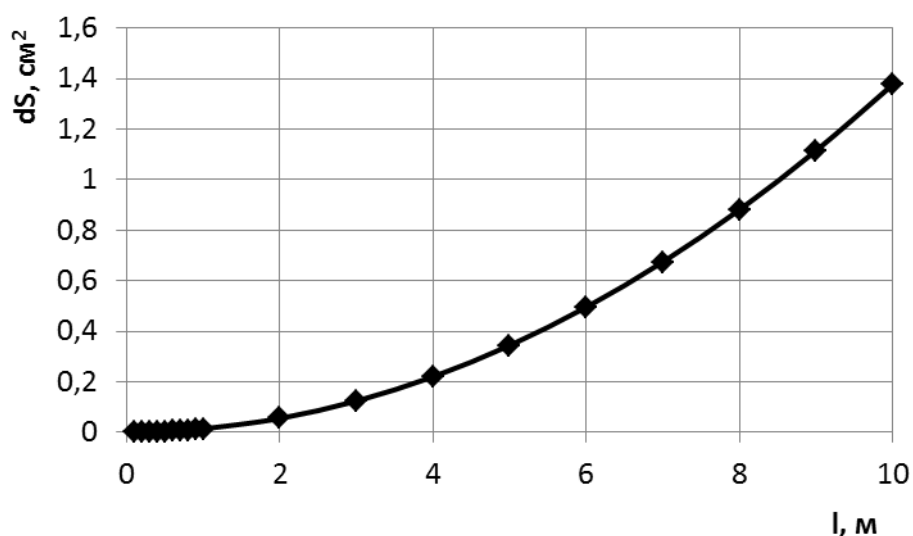


Рисунок 14 – Зависимость минимальной площади объекта, проецируемого на один пиксель матрицы, от расстояния до него

Для данной компоновки измерительной установки расстояние обнаружения составляет 0,5 м с минимальной площадью объекта, приходящегося на один пиксел, равной 1,3 мм^2 .

Дистанцию обнаружения возможно увеличить путем замены микроболометрической камеры на более чувствительную, а также применения субпиксельных алгоритмов обработки.

5. Время обнаружения (экспрессность).

Время обнаружения состоит из времени затрачиваемого на регистрацию данных гиперкуба и времени его обработки и анализа.

Время регистрации данных на всех 56 длинах волн составляет не более 5 мин. Большая длительность регистрации тепловизионных изображений вызвана особенностью процессов перестройки используемого CO_2 -лазера. Время анализа данных гиперкуба на всех 56 длинах волн составляет не более 1 мин. Время регистрации и идентификации веществ может быть уменьшено путем оптимизации процесса измерения, использования набора CO_2 -лазеров, в том числе с фиксированными длинами волн излучения, а также за счет

использования более мощных компьютеров, оптимизации алгоритма и использовании другого языка программирования.

6. Уровень автоматизации комплекса.

Разработанный оптико-электронный комплекс автоматизирован и не требует в управлении особых умений, навыков и квалификации от персонала. Присутствует возможность добавления в библиотеку спектров других веществ, в том числе взрывчатых, опасных и наркотических.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведено теоретическое исследование применимости метода АФСИ для дистанционного обнаружения следов ВВ. Проанализирована и выбрана рабочая область ИК-спектра в диапазоне 8-14 мкм. Исследовано взаимодействие лазерного излучения с опытным образцом. На основе анализа методов обработки гиперспектральных данных выбраны два попиксельных метода – метод спектрального угла и метод минимального расстояния, заключающиеся в сравнении зарегистрированных и эталонных спектров.

2. Установлены оптимальные параметры аппаратуры исследования (лазер – CO₂ с ВЧ накачкой и диффузным охлаждением, мощностью до 10 Вт, и имеющий возможность программной перестройки длины волны в диапазоне 8-14 мкм, ИК-приёмник – неохлаждаемая микроболометрическая камера с матрицей на основе аморфного кремния), выбрано оборудование и разработан измерительный комплекс на базе перестраиваемого CO₂-лазера и микроболометрической камеры с многоэлементной матрицей.

3. Выполнена автоматизация измерительного комплекса дистанционного обнаружения и идентификации следов ВВ, позволяющая управлять процессами генерации лазерного излучения на каждой длине волны с одновременным измерением его характеристик (коэффициент заполнения сигнала управления, мощность излучения, длина волны линий излучения), автоматически для каждой длины волны регистрировать спектральные изображения; а также обрабатывать гиперспектральные данные и выдавать заключение о наличии следов искомых веществ на исследуемой поверхности.

4. Проведена серия экспериментальных исследований по проверке работоспособности и определению характеристик разработанного комплекса на специально подготовленных образцах следовых количеств взрывчатых и взрывобезопасных веществ с известными параметрами. Установлено, что в среднем вероятность обнаружения ВВ составила 88,7 %, предел обнаружения ВВ составил 0,84 мг/см². Комплекс показал высокую селективность при разделении взрывчатых от не взрывчатых веществ. Общее время обнаружения с использованием всех 56 длин волн не превышает 6 мин. Дистанция обнаружения – 0,5 м при минимальной площади объекта, приходящегося на один пиксель, равной 0,013 см².

5. Предложены рекомендации по возможности улучшения характеристик измерительного комплекса программно-алгоритмическими и аппаратурными

способами (замена ИК-камеры на камеру с более высоким разрешением, с более высокой чувствительностью; использование более длиннофокусного объектива; снижения шумов камеры за счет охлаждения; использование квантово-каскадного лазера или набора CO₂-лазеров, в том числе с фиксированными длинами волн излучения; изготовления тестовых мишеней с меньшей поверхностной концентрацией; применение субпиксельных алгоритмов обработки; использование более мощных компьютеров; оптимизация алгоритма ПО; использование другого языка программирования).

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации для опубликования основных результатов диссертаций:

1. Павленко А.А., Максименко Е.В., **Чернышова (Кузовникова) Л.В.** Дистанционное обнаружение следов октогена методом активного формирования спектральных изображений с использованием перестраиваемого CO₂-лазера // Квантовая электроника. – 2014. – Т. 44, № 4. - С. 383-386.

2. Павленко А.А., Максименко Е.В., **Чернышова (Кузовникова) Л.В.** Автоматизированная система определения характеристик излучения перестраиваемых CO₂-лазеров // Датчики и Системы – 2015. – №8(195), С.33-37.

3. Максименко Е.В., **Чернышова (Кузовникова) Л.В.**, Диденко А.В. Создание тестовых образцов для исследования характеристик комплекса дистанционного обнаружения следов взрывчатых веществ // Ползуновский вестник. – 2015. – №4. – Т. 2. – С.140-144.

4. Павленко А.А., Максименко Е.В., **Чернышова (Кузовникова) Л.В.**, Диденко А.В. Определение порога чувствительности комплекса дистанционного обнаружения следов взрывчатых веществ // Ползуновский вестник. – 2016. – №4. – Т. 1. – С.68-72.

Статьи в других научных изданиях:

5. Максименко Е.В., **Чернышова (Кузовникова) Л.В.** Экспериментальная установка для исследования характеристик метода активного формирования спектральных изображений с использованием перестраиваемого CO₂-лазера // Южно-Сибирский научный вестник. – 2014. – № 1. – С. 9–12.

6. Максименко Е.В., **Чернышова (Кузовникова) Л.В.** Дистанционное обнаружение следовых количеств взрывчатых веществ методом активного формирования спектральных изображений // Южно-Сибирский научный вестник. – 2014. – № 2. – С. 64–66.

7. **Чернышова (Кузовникова) Л.В.** Дистанционное обнаружение следов октогена методом активного формирования спектральных изображений // Перспективы создания и применения конденсированных высокоэнергетических материалов: материалы докладов V Всероссийской научно-технической

конференции молодых ученых, г. Бийск, ИПХЭТ СО РАН, 11-12 сентября 2014 г. – Бийск: Изд-во Алт. гос. тех. ун-та, 2014. – С. 188-194.

8. Maksimenko E.V., **Chernyshova (Kuzovnikova) L.V.** Automated System For Registration of Spectral Images Set // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices «EDM 2015»: Conference Proceedings, Erlagol, Altai, 29 June – 3 July 2015. – Novosibirsk: NSTU publishing office, IEEE, 2015. – P. 337-339.

9. Maksimenko E.V., **Chernyshova (Kuzovnikova) L.V.**, Didenko A.V. Applying of Methods of Processing of Hyperspectral Data for Identification of Traces of Explosives // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices «EDM 2016»: Conference Proceedings, Erlagol, Altai, 30 June – 4 July 2016. – Novosibirsk: NSTU publishing office, IEEE, 2016. – P. 358-363.

10. **Кузовникова Л.В.** Анализ гиперспектральных данных для идентификации следов остогена. / Л.В. Кузовникова, Е.В. Максименко, А.А. Павленко, А.В. Диденко // Южно-Сибирский научный вестник. – 2017. – № 2. – С. 24–28.

11. **Кузовникова Л.В.** Определение характеристик оптико-электронного комплекса обнаружения следов ВВ. / Л.В. Кузовникова, Е.В. Максименко // Южно-Сибирский научный вестник. – 2017. – № 3. – С. 74–77.

Патенты и свидетельства:

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015613911. Программа автоматического управления измерительным комплексом для определения характеристик перестраиваемых СО₂-лазеров // Павленко А.А., Максименко Е.В., **Чернышова (Кузовникова) Л.В.**, Диденко А.В.– 30 марта 2015 г.

Подписано в печать 18.10.2018 г.
Формат А5. Бумага офсетная. Печать лазерная. Тираж 100 экз.
Заказ № 18/10/18 отпечатано в типографии «Аквамарин»
634050, г. Томск, Московский тракт 2г. Т. 933-529