

Дистанционное обнаружение следов октогена методом активного формирования спектральных изображений с использованием перестраиваемого CO₂-лазера

А.А.Павленко, Е.В.Максименко, Л.В.Чернышова

Получены результаты экспериментов по дистанционному обнаружению следов октогена на различных поверхностях методом активного формирования спектральных изображений в ИК области.

Ключевые слова: взрывчатые вещества, спектральные изображения, CO₂-лазер.

1. Введение

В настоящее время во всём мире ведутся работы по поиску новых и по совершенствованию используемых методов обнаружения взрывчатых веществ (ВВ). Об этом свидетельствуют многочисленные публикации и данные изобретательской активности [1–5].

В России и за рубежом разработан и производится целый ряд средств поиска зарядов ВВ и взрывоопасных предметов как по прямым признакам (наличие ВВ или его отдельных компонентов) [6–9], так и по косвенным (наличие металлических и пластмассовых деталей, полупроводниковых приборов, взрывателей, проводных линий, антенн, определённая форма корпуса и т. д.) [10].

Среди всех методов обнаружения ВВ особо выделяют дистанционные методы, в которых осуществляющие досмотр лица и оборудование находятся на безопасном расстоянии от объекта досмотра (10–100 м и более). Дистанционность обнаружения в таких методах позволяет не только существенно снизить риск для обслуживающего персонала, гражданских лиц, оборудования и материальных ценностей при досмотре неподвижных объектов, но и существенно увеличить допустимое время принятия решений в случае досмотра движущихся объектов, например в потоке транспорта или в пассажиропотоке [1, 4, 11]. Наиболее перспективными методами дистанционного обнаружения ВВ являются оптические лазерные методы, использующие уникальные свойства лазеров как источников зондирующего излучения высокой спектральной мощности, монохроматичности, пространственной и временной когерентности [11].

В последнее время быстро развивается техника дистанционного исследования объектов, базирующаяся на методах оптического спектрального анализа и на распознавании изображений и получившая в русскоязычной литературе название «метод активного формирования

спектральных изображений». Опубликованные работы по применению такого метода для дистанционного обнаружения следов различных химических веществ на поверхностях тел свидетельствуют о его перспективности, в том числе и для идентификации различных ВВ [12–15]. Следует отметить, что отечественные публикации по применению данного метода для дистанционного обнаружения ВВ за исключением обзорных статей отсутствуют.

В настоящей работе представлены результаты исследований по дистанционному обнаружению следов октогена методом активного формирования спектральных изображений с использованием перестраиваемого CO₂-лазера ИК диапазона и общепромышленного тепловизора с неохлаждаемым приёмником.

2. Метод активного формирования спектральных изображений

Метод заключается в получении многомерного пространственно-спектрального изображения (называемого также гипер- или мультиспектральным изображением) в результате облучения поверхности интересующего объекта перестраиваемым источником узкополосного монохроматического излучения. Диапазон перестройки длины волны источника излучения лежит в области спектра, в которой сосредоточены полосы поглощения интересующего вещества. В качестве такого источника в основном используются лазерные источники излучения. После взаимодействия излучения с исследуемым веществом отклик в виде диффузно рассеянного излучения и излучения поверхности, зависящего от коэффициента поглощения вещества, регистрируется с помощью многоэлементного приёмника. При перестройке длины волны излучения изменяется соотношение между поглощённой и рассеянной объектом энергией, что может привести к заметному контрасту между отдельными деталями наблюдаемой картины. Гипер- и мультиспектральные изображения могут быть получены как в рассеянном свете, так и в испускаемом объектом излучении (рис. 1).

Рассмотрим процесс формирования спектральных изображений поверхности с частицами ВВ при использовании излучения перестраиваемого лазера (рис. 2). Излучение лазера рассеивается оптическим элементом и подсвечивает объект со следами ВВ на поверхности, которая наблюдается при помощи многоэлементного приёмника.

А.А.Павленко, Е.В.Максименко, Л.В.Чернышова. Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Россия, Алтайский край, 659322 Бийск, Социалистическая ул., 1; e-mail: ipcet@mail.ru, eugene.maksimenko@yandex.ru, lvchernyshova@bk.ru

Поступила в редакцию 28 октября 2013 г., после доработки – 30 декабря 2013 г.

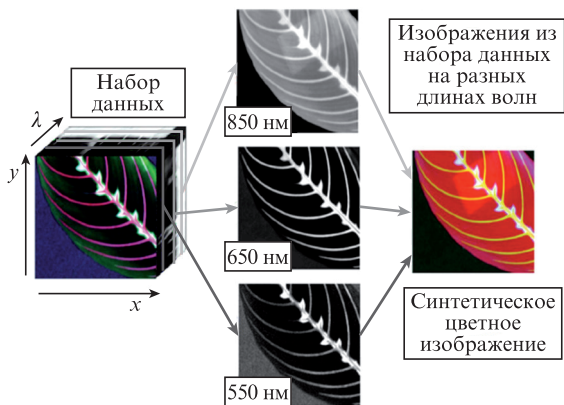


Рис.1. Пример мультиспектрального изображения.

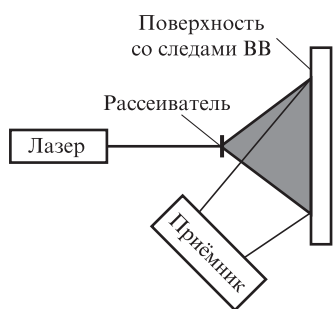


Рис.2. Схема подсветки поверхности с частицами ВВ.

Падающее на поверхность излучение частично поглощается с коэффициентом поглощения (излучения) ϵ_{surf} , частично отражается с коэффициентом отражения r_{surf} .

Согласно закону Кирхгофа для непрозрачной поверхности $r_{surf} = 1 - \epsilon_{surf}$. Для следов ВВ коэффициенты излучения и отражения обозначим ϵ_{expl} и r_{expl} соответственно. Зарегистрированное приёмником излучение состоит из рассеянного поверхностью, с полной мощностью $P_{surf} \approx r_{surf} E_{las}$, и рассеянного следами ВВ, с полной мощностью $P_{expl} \approx r_{expl} E_{las}$ (E_{las} – мощность лазерного излучения).

Признаком, позволяющим однозначно идентифицировать вещество, является его ИК спектр поглощения. На рис.3 приведены ИК спектры поглощения некоторых взрывчатых веществ, выбранные из базы данных ИК фурье-спектрометра «Инфралюм ФТ-801».

Различие коэффициентов отражения (поглощения) материалов поверхности и следов ВВ во всём диапазоне перестройки источника излучения (ИК спектры) определяет возможность идентификации исследуемого вещества на поверхности. Чем больше различие, тем, следовательно, проще идентификация, и наоборот. При этом многоэлементный приёмник регистрирует области различной интенсивности, определяемые положением ВВ на поверхности.

Потенциальные возможности метода активного формирования спектральных изображений в первую очередь определяются спектральным диапазоном зондирующего излучения и разрешением приёмника, а селективность метода – возможностью различения особенностей ИК спектров поглощения материалов (положения полос погло-

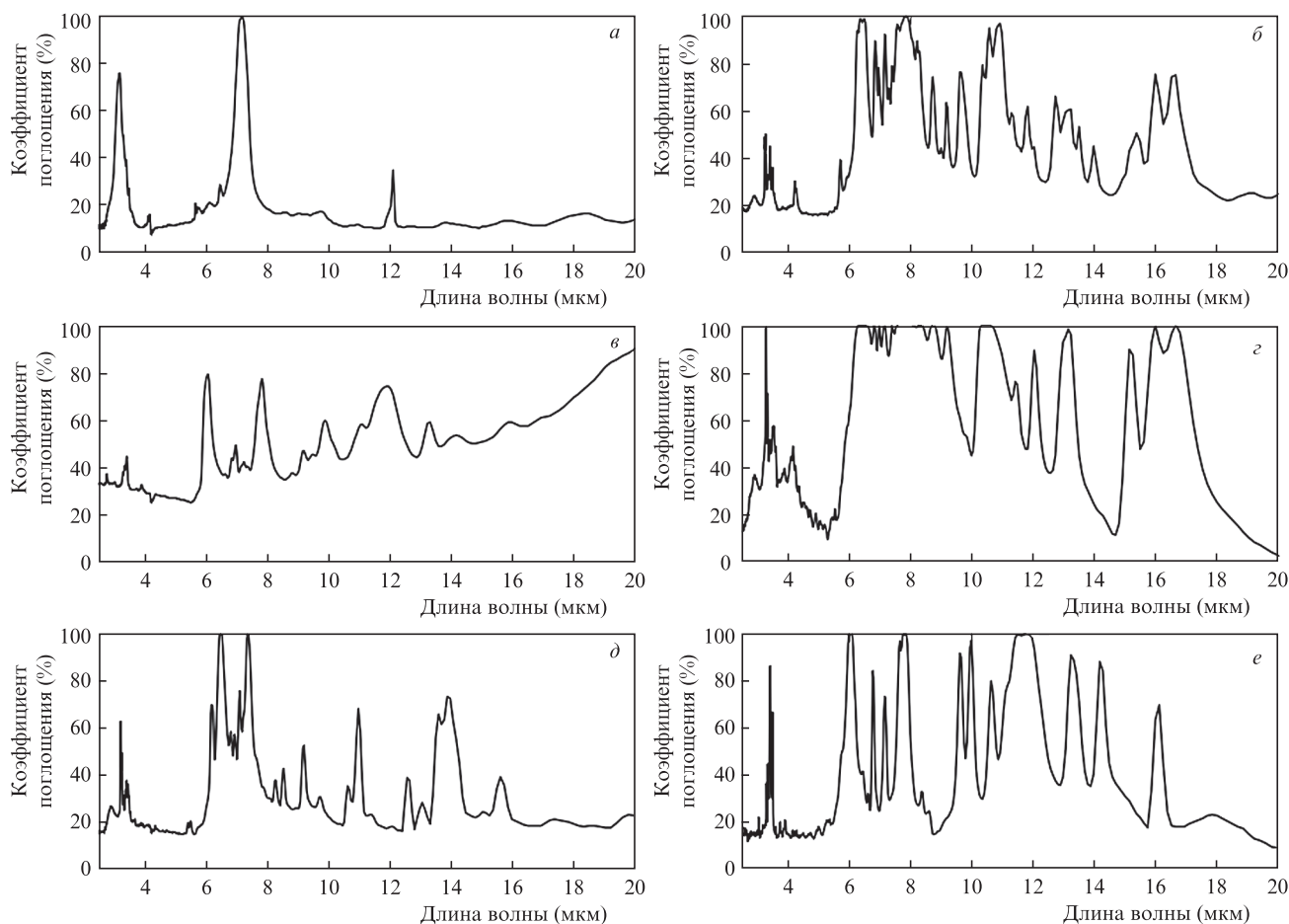


Рис.3. ИК спектры поглощения некоторых ВВ: аммиачная селитра (а), гексоген (б), нитроглицерин (в), октоген (г), тротил (д), пентаэритриттетранитрат (ТЭН) (е).

щения, их ширины и относительной интенсивности) путём сканирования как можно большего спектрального диапазона, что приводит к необходимости использования перестраиваемых источников зондирующего излучения. Чем больше определено спектроскопических особенностей вещества, тем точнее его идентификация.

Так, например, аммиачная селитра (рис.3,а) может быть определена по основным полосам поглощения с $\lambda \approx 3.2, 7.2$ и 12.1 мкм, тротил (рис.3,д) – по полосам с $\lambda \approx 3.2, 6.5, 7.4, 11, 14$ мкм. Кроме основных полос поглощения, для идентификации вещества могут дополнительно использоваться другие, малоинтенсивные полосы поглощения.

Очевидно, что для успешной дистанционной идентификации ВВ с использованием перестраиваемого CO₂-лазера с дискретным набором линий излучения необходимо наличие выраженных спектроскопических особенностей (максимумов и минимумов) в ИК спектре поглощения ВВ на длинах волн излучения лазера.

Важной особенностью ИК спектров является то, что изменение угла наблюдения и температуры объекта одинаково влияет на коэффициенты поглощения (излучения) во всём спектральном диапазоне, не приводя к появлению новых выраженных особенностей в спектре поглощения.

3. Экспериментальная установка

Для исследования характеристик метода активного формирования спектральных изображений разработана экспериментальная установка, схема которой приведена на рис.4. В качестве источника излучения ИК диапазона был выбран CO₂-лазер типа LCD-5WGT с возможностью перестройки по длинам волн. Его основные характеристики приведены ниже.

Длина волны лазерного излучения (мкм)	... 9.18–10.81
Мощность излучения (на сильных линиях) (Вт)	... 8.0–10.5
Модовый состав	... 90% TEM ₀₀
Поляризация	... линейная
Энергетическая расходимость лазерного излучения по уровню 0.5 (рад)	... не более 10 ⁻²
Диаметр пучка лазерного излучения на выходном зеркале (мм)	... не более 1.8
Нестабильность мощности лазерного излучения в течение 30 мин на наиболее сильных переходах (%)	±4.2

Лазерное излучение рассеивалось оптическим элементом и подсвечивало объект со следами исследуемого вещества на поверхности. Подсвеченная поверхность наблюдалась при помощи тепловизионного приёмника. Для контроля мощности излучения и его спектра пучки излучения с помощью светоделительных пластинок на-

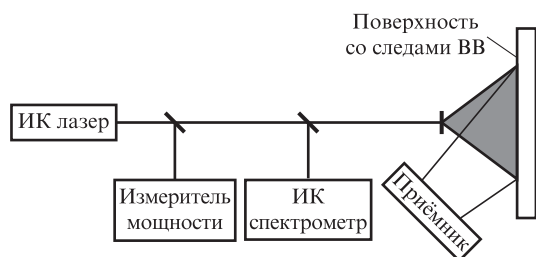


Рис.4. Схема экспериментальной установки.

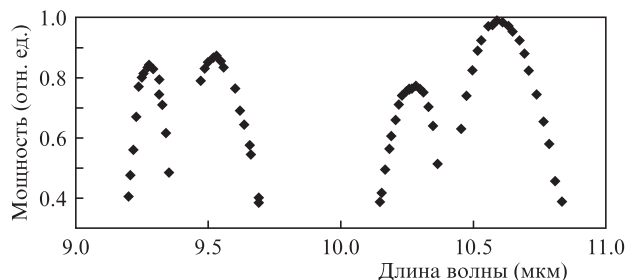


Рис.5. Зависимость относительной мощности лазерного излучения от длины волны.

правлялись на измеритель мощности и на входную щель ИК спектрометра. Зависимость мощности лазерного излучения от длины волны приведена на рис.5.

В спектре излучения лазера присутствуют локальные максимумы мощности, характеризующие основные колебательные состояния молекул CO₂. Для получения сопоставимых результатов при регистрации спектральных изображений на различных длинах волн неравномерность мощности излучения лазера необходимо либо аппаратно компенсировать подстройкой мощности, либо учитывать при дальнейшей программной обработке.

Лазер требует принудительного водяного охлаждения излучателя и источника питания. Для его обеспечения использовался циркуляционный охладитель LAUDA WK 2200. Измерение мощности лазерного излучения осуществлялось при помощи измерителя мощности Gentec-EO UP19K-30H-H5-D0 с монитором MAESTRO, основные характеристики которого приведены ниже.

Максимальная мощность непрерывного излучения (Вт)	30
Максимальная средняя мощность в течение 1 мин (Вт)	... 60
Эффективная апертура (мм)	... 19
Спектральный диапазон (мкм)	... 0.19–20
Чувствительность (мВ/Вт)	... 0.65
Время нарастания (с)	... 0.6

Длины волн всего диапазона перестройки лазера измерялись при помощи ИК фурье-спектрометра «Инфралюм ФТ-801», спектральный диапазон которого перекрывает необходимую область спектра. Технические характеристики ИК фурье-спектрометра приведены ниже.

Спектральный диапазон (дистанционные измерения) (мкм)	... 2–12
Спектральное разрешение (см ⁻¹)	... 0.5, 1, 2, 4
Пределы допускаемой систематической погрешности измерения волновых чисел (см ⁻¹)	... ±0.05
Пределы допускаемой случайной погрешности результатов измерений волновых чисел (см ⁻¹)	... ±0.02

Первоначальная настройка оптической системы установки, а также регистрация спектральных ИК изображений на объекте исследования осуществлялись при помощи установленного на штативе тепловизора FLIR i60, технические характеристики которого приведены ниже.

Диапазон измеряемых температур (°C)	... -20 ÷ 350
Температурная чувствительность при 30°C (°C)	... 0.08
Погрешность измерения	... ±2°C (±2%)
Тип матрицы	... неохлаждаемый микроболومتر
Размер матрицы (пиксели)	... 140×140

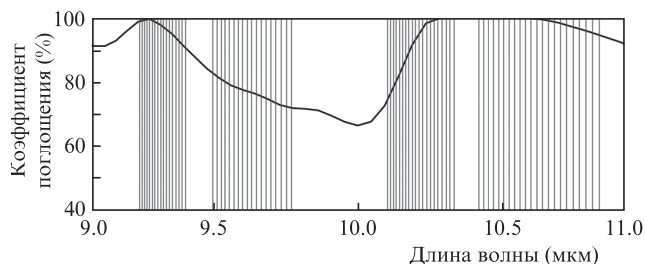


Рис.6. ИК спектр поглощения октогена.

4. Проведение экспериментов на образцах

Исследование возможностей дистанционного обнаружения ВВ проводилось на микроколичествах (следах) октогена, нанесённых на различные материалы. На рис.6 приведён ИК спектр поглощения октогена в диапазоне генерации перестраиваемого CO₂-лазера. Вертикальными линиями на рисунке показаны длины волн излучения лазера. Спектр выбран из базы данных ИК фурье-спектрометра «Инфралюм ФТ-801».

Использовался октоген марки ВДО (средний размер частиц менее 50 мкм, удельная поверхность 3000–5000 см²/г), нанесённый на искусственную кожу и бумагу. Схема расположения октогена на образцах-подложках приведена на рис.7, а внешний вид образцов показан на рис.8. Площадь участков подложки со следами октогена составляла ~36 см², удельная масса октогена – не более 1 мг/см². Последняя определялась взвешиванием образцов до и после нанесения. Взвешивание проводилось на аналитических весах CAS CAUX 220 с ценой деления 0.0001 г, пределом допускаемой погрешности 0.001 г (класс точности I специальный по ГОСТ 53228-2008).

Образцы-подложки располагались на расстоянии 1340 мм от рассеивающего оптического элемента. При исследованиях угол наблюдения между осью оптической

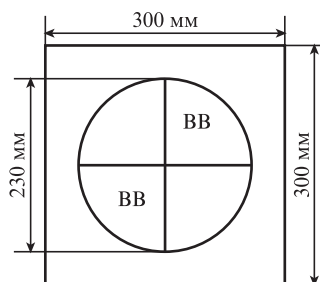


Рис.7. Расположение ВВ на подложке.

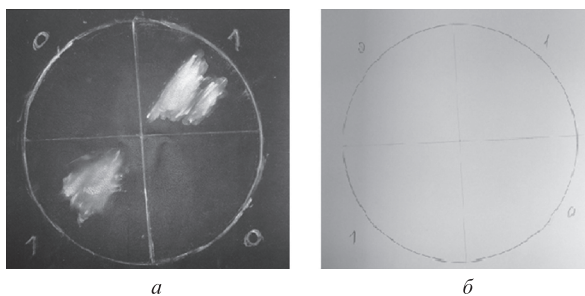
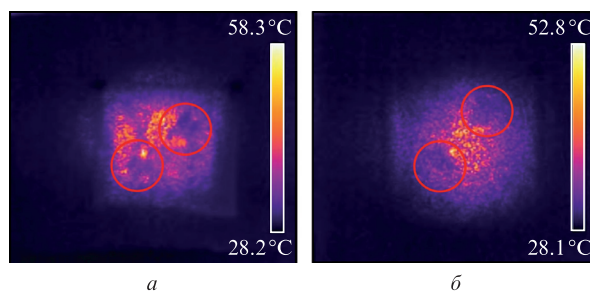


Рис.8. Образцы искусственной кожи (а) и бумаги (б) с нанесёнными следами октогена.

Рис.9. Тепловизионные изображения подложек из искусственной кожи ($\lambda = 9.315$ мкм, средняя температура 33.2°C в области нанесения ВВ и 40.6°C в области, свободной от ВВ) (а), а также из бумаги ($\lambda = 9.535$ мкм, средняя температура 32.4°C в области нанесения ВВ и 41.3°C в области, свободной от ВВ) (б).

системы и осью тепловизионного прибора составил 18°. Интенсивность лазерного излучения на поверхности объекта изменялась от 13 Вт/м² (на краю области подсветки) до 61 Вт/м² (на оптической оси).

В экспериментах в режиме реального времени были получены спектральные изображения следов октогена на образцах-подложках при воздействии на них излучения с различными длинами волн (рис.9).

Видно четкое выделение формы и положения нанесённых следов октогена. Разница измеренной тепловизором средней температуры в области нанесения октогена и вне её достигала 7.3°C для подложки из искусственной кожи и 8.9°C для бумажной подложки.

5. Заключение

Результаты проведенных исследований показали возможность применения метода активного формирования спектральных изображений для дистанционного обнаружения следов октогена с использованием перестраиваемого CO₂-лазера ИК диапазона и общепромышленной тепловизионной камеры.

Рассмотренный метод является перспективным для дистанционного обнаружения следов ВВ и их идентификации на одежде людей и на принадлежащих им предметах.

1. *Existing and Potential Standoff Explosives Detection Techniques* (Washington DC: The National Academies Press, 2004).
2. Thiesen L., Hannum D.W., Murray D.W., Parmeter J.E. *Survey of Commercially Available Explosives Detection Technologies and Equipment 2004* (Washington: U.S. Department of Justice, 2005).
3. Caygill J.S., Davis F., Higson S.T. *Int. J. Pure Appl. Analytical Chem.*, **88**, 14 (2012).
4. Скворцов Л.А. *Квантовая электроника*, **42** (1), 1 (2012).
5. Сильников М.В., Чернышов М.В. <http://www.ormvd.ru/pubs/15189/>.
6. http://www.ratec-spb.ru/index.php?catalog&devices_type=1.
7. <http://www.logsys.ru/apparat/vv.htm>.
8. <http://www.bnti.ru/des.asp?itm=5591&tbl=02.01.01.01>.
9. http://www.rapiscansystems.com/en/products/trace_detection/rapiscan_he50.
10. http://www.sds.l-3com.com/auto_explv_detect/mvt-hr.htm.
11. Munson C.A., Gottfried J.L., De Lucia F.C. *Laser-Based Detection Methods for Explosives* (Adelphi: Army Research Laboratory Weapons and Materials Research Directorate, 2007).
12. Wang Yi, Wang Y., Le H.Q. *Opt. Express*, **13** (17), 6572 (2005).
13. Phillips M.C., Hô N. *Opt. Express*, **16** (3), 1836 (2008).
14. Scharlemann E.T. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5154**, 126 (2003).
15. Papantonakis M.R., Kendziora C., Furstenberg R., Stepnowski S.V., Rake M., Stepnowski J., McGill R.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7304**, 730418 (2009).