

# Дистанционное обнаружение взрывчатых веществ с помощью методов активного формирования спектральных изображений

Л.А.Скворцов

*Рассмотрены лазерные методы standoff детектирования находящихся на поверхности тел следовых остатков взрывчатых веществ (ВВ). Эти методы основаны на активном формировании мульти- и гиперспектральных изображений объекта досмотра. Обсуждаются возможности методов и перспективы их развития. Особое внимание уделяется обоснованию наиболее предпочтительной области применения рассматриваемой техники.*

**Ключевые слова:** лазерная спектроскопия, формирование спектральных изображений, гиперспектральное изображение, standoff детектирование, детектирование следов взрывчатых веществ, обзор.

	Содержание
1. Введение .....	1051
2. Мульти- и гиперспектральные изображения .....	1052
3. Пассивный и активный методы формирования спектральных изображений .....	1053
4. Применение активных методов для standoff детектирования ВВ .....	1054
4.1. Формирование гиперспектральных изображений в рассеянном свете	
4.2. ИК фототермические изображения при резонансном воздействии на объект	
4.3. Рамановские гиперспектральные изображения	
5. Выводы .....	1059
6. Литература .....	1060

## 1. Введение

Большинство технологий, используемых для детектирования следов взрывчатых веществ (ВВ), например спектрометрия ионной подвижности [1, 2] и хроматография [3, 4], применяются для осуществления контроля в газовой фазе. К сожалению, при комнатной температуре давление паров большинства ВВ чрезвычайно мало (концентрация – единицы ppb или меньше), а маскировка ВВ путем их помещения, например, в пластиковые пакеты уменьшает концентрацию еще примерно на три порядка [5]. Это делает практически невозможным обнаружение следов большинства ВВ в газовой фазе существующими методами. В то же время известно, что частицы ВВ сильно связываются с подложкой силами адгезии, поэтому даже при аккуратном обращении с ними трудно избежать переноса частиц на дверные ручки, обувь, пешеходные дорожки, транспортные средства и т. п. [6]. Для сведения, количество ВВ, оставляемых одним отпечатком пальца на поверхностях предметов, составляет ~10 мкг [7]. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка так называемых standoff методов обнаружения следовых остатков частиц ВВ на поверхностях объектов, когда осу-

ществляющие досмотр лица и оборудование находятся на безопасном расстоянии (10 – 100 м) от объекта досмотра [8]. Наибольшими возможностями в решении проблемы быстрого standoff обнаружения и идентификации следов как известных, так и новых типов ВВ в многокомпонентной среде обладают методы лазерной спектроскопии [9–13].

Требования, предъявляемые к standoff обнаружению ВВ, заметно отличаются от требований в случае локальной проверки [8–11, 13]. Тем не менее определенные критерии являются универсальными. К ним относятся низкий уровень ложного срабатывания, а также высокие чувствительность и селективность анализа при проведении досмотра. В то же время для standoff зондирования объекта немаловажно, чтобы досмотр носил скрытый характер, был безопасным для глаз и осуществлялся в режиме реального времени. К этому необходимо добавить, что для создания переносных, так называемых handheld сенсорных устройств первостепенное значение приобретают весогабаритные характеристики, простота и надежность в эксплуатации, а также стоимость изделия.

Такие методы standoff детектирования остатков ВВ на поверхности тел, как рамановская спектроскопия (Raman Spectroscopy) [9–12], спектроскопия индуцированного лазерным излучением пробоя (LIBS) [9–12, 14], лазерно-индуцированная флуоресценция продуктов фотофрагментации/фотодиссоциации (PF–LIF, PD–LIF) [9, 11, 15] уже были испытаны в реальных условиях и рассматриваются в настоящее время как наиболее зрелые и продвинутое технологии. В то же время ни один из пере-

Л.А.Скворцов. Институт криптографии, связи и информатики, Россия, 11760 Москва, Мичуринский просп., 70;  
e-mail: lskvortsov@gmail.com

Поступила в редакцию 8 июля 2011 г., после доработки – 21 октября 2011 г.

численных методов на сегодняшний день не удовлетворяет в полной мере требованиям, предъявляемым к stand-off сенсорным устройствам [9 – 11, 13]. В связи с этим вполне понятен интерес к разработке новых перспективных методов дистанционного обнаружения и идентификации следовых количеств ВВ на поверхностях тел.

В настоящей статье рассматривается один из новых методов – Active Spectral Imaging (Active SI) [16–20]. Устоявшегося названия, адекватно отображающего сущность этого метода, в нашей литературе пока нет. Наиболее подходящими можно считать такие, как метод активного формирования спектральных изображений, активное спектральное отображение или активная спектроскопия изображений [13]. В дальнейшем мы будем называть этот метод методом активного формирования спектральных изображений, что, на наш взгляд, наиболее точно отражает его суть. В настоящей работе обсуждаются возможности и перспективы развития метода Active SI. Особое внимание при этом уделяется обоснованию наиболее предпочтительной области применения рассматриваемой техники.

Из-за ограниченного объема статьи результаты исследований изложены в сжатой форме, а для более детального ознакомления с отдельными аспектами проблемы мы будем отсылать читателя к оригинальным работам, обзорам и монографиям.

## 2. Мульти- и гиперспектральные изображения

В последние два десятилетия быстро развивается техника дистанционного исследования объектов, использующая методы оптического спектрального анализа и распознавания изображений (Spectral Imaging, SI) [21–27]. Фундаментальной основой этого направления является однозначное соответствие между регистрируемым оптическим сигналом и составом отражающей или излучающей поверхности. С помощью упомянутых методов в изображениях исследуемой поверхности в выбранном узком спектральном диапазоне удается наблюдать фрагменты, различающиеся спектральной яркостью, что обусловлено различными коэффициентами отражения, поглоще-

ния или излучения. При этом объемы оптической информации об исследуемых объектах увеличиваются на порядки по сравнению со случаем, когда объект наблюдают в широком спектральном диапазоне, например с помощью обычного тепловизора. Изображения объекта условно разделяют на мультиспектральные и гиперспектральные [21–23].

Мультиспектральные изображения получают с помощью цифровых датчиков (обзорные спектрометры), которые измеряют отраженную (рассеянную, излученную) поверхностью исследуемого объекта энергию в достаточно широких спектральных областях, находящихся в разных спектральных диапазонах. Принцип получения гиперспектральных изображений тот же, что и мультиспектральных. Отличие же состоит в том, что для гиперспектральной съемки важно не количество спектральных зон (каналов), а ширина зоны и последовательность измерений. Например, съемочная система с 20 каналами будет гиперспектральной, если она охватывает диапазон 500 – 700 нм, а ширина каждой спектральной зоны не превышает 10 нм. В свою очередь съемочная система с 20 каналами будет считаться мультиспектральной, если она охватывает диапазон от видимой до средней ИК области спектра [22, 23]. Таким образом, полученные с помощью обзорных спектрометров гиперспектральные данные представляют собой практически непрерывный спектр для каждого элемента изображения (пикселя).

Наиболее распространенными на сегодняшний день являются гиперспектрометры, одновременно регистрирующие на двумерную матрицу излучение, которое отражается, рассеивается или излучается небольшим участком поверхности. Основным понятием в технике получения гиперспектрального изображения является «гиперкуб» [22, 23], представляющий собой множество данных, образованных интенсивностями рассеянного (излучаемого) двумерной поверхностью объекта светового сигнала, условно разбитой на элементы изображения – пиксели. К двум стандартным пространственным координатам  $X$  и  $Y$  добавляется спектральная координата  $\lambda$ , что обеспечивает трехмерность пространства данных (рис.1). Кроме того, может добавляться еще и поляризационная координата. Таким образом, регистрируемые гиперспектрометром дан-

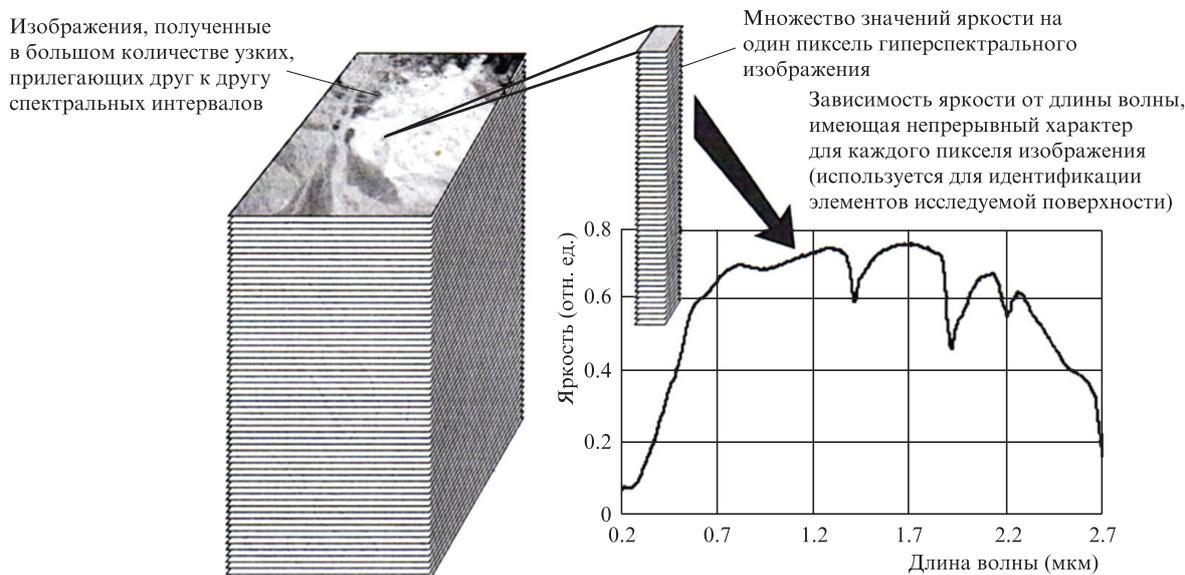


Рис.1. Гиперспектральный куб [22].

ные представляют собой значения функции, заданной в многомерном пространстве.

Спектральные кривые, отражающие зависимость между длиной волны и отражательной (излучательной) способностью исследуемого объекта, позволяют выделить и идентифицировать различные материалы. Поскольку материал реальной поверхности, как правило, неоднороден, наличие различных веществ в области, представленной отдельным пикселем, приводит к возникновению спектрально-смешанного отраженного (излученного) сигнала. Для дешифрирования какой-либо области, выделяемой на снимке, с целью идентификации находящихся на ней веществ используются спектральные библиотеки и специально разработанные алгоритмы [21, 28].

### 3. Пассивный и активный методы формирования спектральных изображений

Формирование спектральных изображений объекта может быть как пассивным, так и активным. Упрощенные схемы, иллюстрирующие эти два подхода, представлены на рис.2 [20] и рис.3 [29]. Пассивные мульти- и гиперспектральные системы (Imaging Systems, SI), которые работают в видимом и ближнем ИК диапазонах длин волн, измеряют отраженное от объектов солнечное излучение. Величина потока излучения, измеренная датчиком, зависит от многих факторов. Это отражательные и излучательные свойства объекта, величина поглощения солнечного излучения в атмосфере, условия освещения объекта, взаимное расположение объекта и сенсорного устройства, характеристики системы, принимающей отраженное объектом излучение. Для многих приложений зависимость регистрируемого сигнала от перечисленных факторов может существенно усложнить анализ полученных данных, а следовательно, затруднить или сделать невозможным сравнение спектральных данных об объекте, полученных в разных условиях [19].

Тем не менее пассивный метод нашел применение в таких областях, как картирование объектов земной поверхности, мониторинг атмосферы, поиск месторождений, изучение состояния почв, определение типа и состояния растительного покрова и т.д. [24–27]. Этому во многом способствовало использование для решения перечислен-

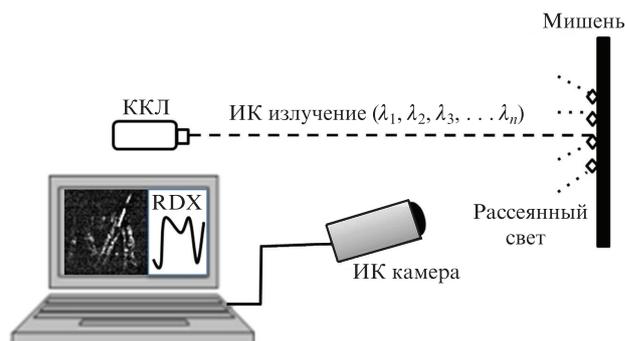


Рис.3. Упрощенная схема Active SI [29].

ных задач широкополосного солнечного излучения, что, пожалуй, является основным достоинством пассивного метода. При этом для получения изображений в заданных узких спектральных интервалах обычно применяется оптическая фильтрация принимаемого излучения с помощью различных перестраиваемых оптических фильтров (например, акустооптических, интерференционных или поляризационных) [30, 31]. Возможность применения пассивного метода формирования спектральных изображений для дистанционного обнаружения остатков ВВ на поверхностях тел была продемонстрирована в [32–34].

Активный метод формирования спектральных изображений предполагает дополнительное воздействие на объект лазерного излучения [16–20]. Его основные преимущества – большая спектральная яркость (соответственно большое отношение сигнал/шум) и высокое спектральное разрешение. Величина последнего, а также ширина области перестройки лазера во многом определяют селективность метода. Кроме того, применять активный метод можно в любое время суток, и для него не характерны дефекты изображения, связанные с затенением отдельных частей объекта.

Активный метод формирования спектральных изображений перспективен для standoff обнаружения и идентификации химических соединений, в том числе следовых остатков ВВ на поверхностях тел. Общая концепция этого метода, последовательно развиваемого в работах [35–38], достаточно проста. Перестраиваемый в среднем

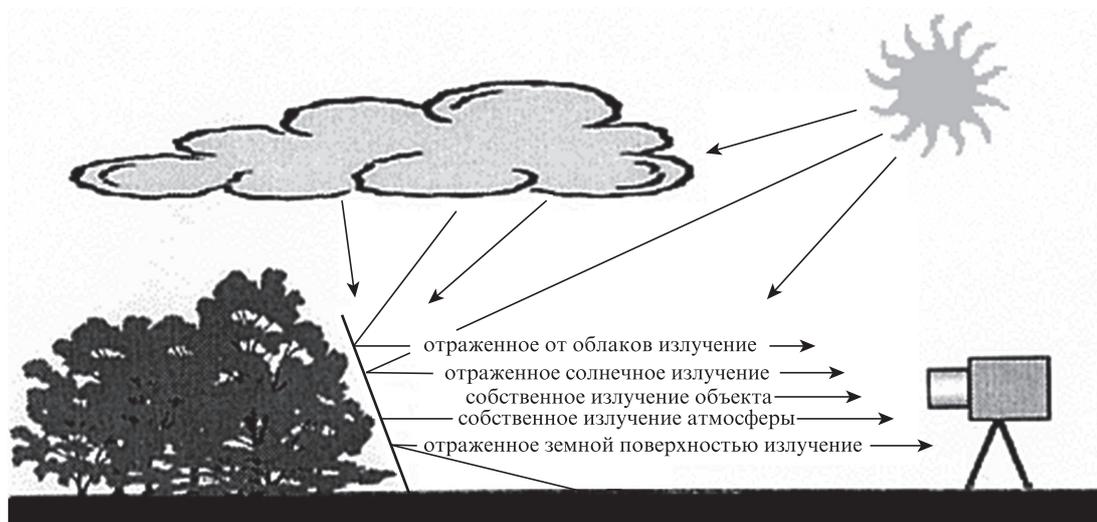


Рис.2. Схема пассивного метода Spectral Imaging [20].

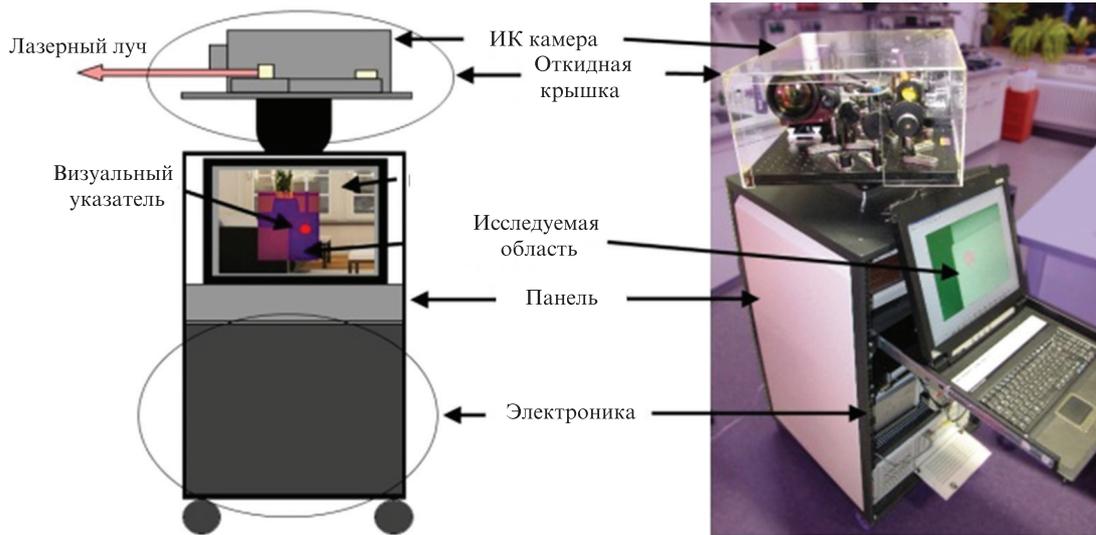


Рис.4. Портативная система Active SI для standoff обнаружения следов ВВ [37].

ИК диапазоне спектра лазерный источник с узкой полосой генерации воздействует на мишень, поверхность которой содержит следы ВВ. При этом область перестройки лазера включает в себя полосы поглощения материалов, подлежащих обнаружению. Отклик мишени на лазерное воздействие в виде диффузно-рассеянного излучения регистрируется с помощью ИК камеры, чувствительным элементом которой является многоэлементная матрица. При варьировании длины волны лазерного излучения изменяется соотношение между поглощенной и рассеянной мишенью энергией. Например, увеличение поглощения в мишени приводит к уменьшению интенсивности рассеянного света, достигающего фотоприемного устройства. Это, в свою очередь, приводит к появлению заметного контраста между отдельными деталями наблюдаемой сцены. Создаваемый таким образом гиперспектральный куб содержит пространственно-разрешенный сигнал как функцию длины волны рассеянного излучения. На рис.4 показана портативная Active SI система для standoff обнаружения следов ВВ. Гипер- и мультипектральные изображения ВВ были получены не только в рассеянном свете, но и в испускаемом объектом тепловом излучении [39–42], а также в рамановском спектре [43, 44].

#### 4. Применение активных методов формирования изображений для standoff детектирования ВВ

##### 4.1. Формирование гиперспектральных изображений в рассеянном свете

В качестве примера рассмотрим последнюю из известных нам работ группы исследователей из IAF (Fraunhofer Institute for Applied Solid State Physics) [38]. Источником излучения в работе служил квантово-каскадный лазер (ККЛ), диапазон перестройки частоты излучения которого превышал  $175 \text{ см}^{-1}$ , что составляет  $\sim 13\%$  всего среднего ИК диапазона спектра ( $1200 - 1400 \text{ см}^{-1}$ ). Максимальная средняя мощность лазерного излучения достигала 40 мВт на длине волны генерации 7.4 мкм. Длительность импульса генерации составляла 100 нс при частоте следова-

ния, превышающей 1 МГц. Используемая в работе ИК камера с охлаждаемым фокально-плоскостным матричным приемником (Focal Plane Array, FPA) на основе соединения HgCdTe имела формат  $256 \times 256$  элементов. Диапазон регистрируемых длин волн излучения находился в пределах 4.2–10.5 мкм, частота кадров была равна 400 Гц. Для сбора рассеянного излучения применялась ИК оптика с фокусным расстоянием 100 мм, при этом дифференциальная методика измерений предусматривала возможность вычитания теплового фона [37]. В работах исследовались остатки TNT (тринитротолуол) и PETN (пентаэритритол тетранитрат) на листовой стали кузова автомобиля, а также на джинсовой ткани и матерчатой сумке. Одновременно на упомянутых поверхностях находились вещества (интерференты), спектры поглощения которых были схожи со спектрами ВВ (парацетамол, косметическая пудра) (рис.5). Концентрация ВВ варьировалась в пределах  $0.1 - 10 \text{ мг/см}^2$  при расстоянии до объекта  $\sim 1 \text{ м}$ .

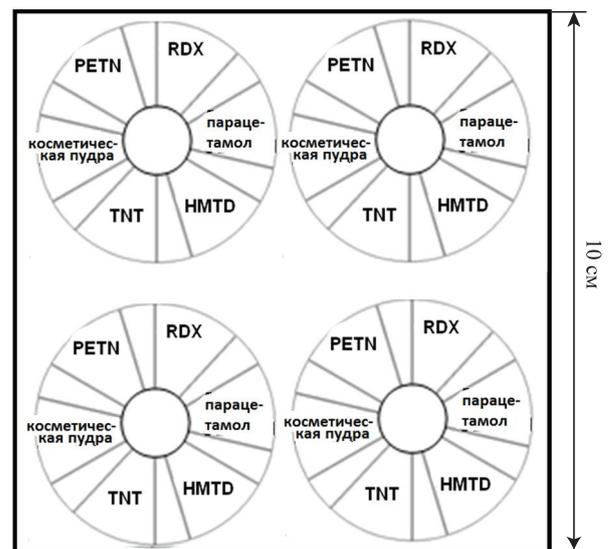


Рис.5. Схема расположения образцов для исследования [38] (RDX – циклотриметилен тринитрамин, HMTD – гексаметилен трипероксид диамин).

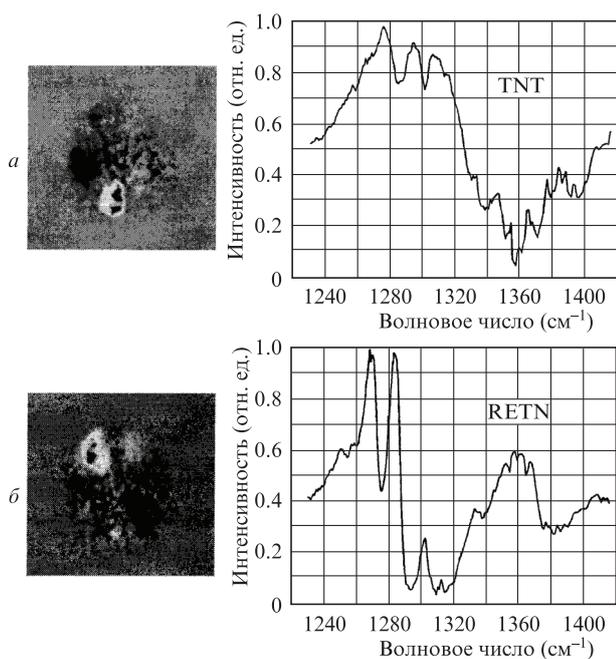


Рис.6. Спектры отражения (справа) и восстановленные по ним изображения (слева) остатков TNT (а) и PETN (б) на подложке [38].

На рис.6 представлены полученные в [38] спектры отражения TNT и PETN в области перестройки частоты излучения лазера, а также восстановленные по ним изображения этих материалов на подложке. Видно, что участки с ВВ соответствуют их реальному расположению на мишени (рис.5). Анализ данных, содержащихся в созданном гиперспектральном кубе, проводился с применением метода главных компонент [45, 46]. В то же время авторы [38] отмечают, что лучшие результаты при разделении спектральных характеристик каждого отдельного вещества в смеси можно получить с помощью метода независимых компонент [47, 48].

Одним из недостатков обсуждаемой технологии является наличие на изображении спекл-шума, появление которого обусловлено интерференционно-дифракционными эффектами, имеющими место при отражении когерентного излучения от поверхности мишени (рис.7,а). Однако этот недостаток преодолим. Так, для повышения качества изображения в [35] разработано специальное устройство, ухудшающее когерентные свойства лазерного излучения и представляющее собой две пластины из поликристаллического алмаза, одна из которых неподвижна, а вторая вращается относительно своей оси. Результат применения такого устройства показан на рис.7,б.

В работе [38] были получены также обнадеживающие результаты и при использовании ИК камеры с неохла-

даемой матрицей микроболометров. Эквивалентная шуму разность температур (NETD) составляет для нее ~100 мК, что примерно на порядок хуже, чем для охлаждаемых фотоэлектрических приемников [49]. Тем не менее авторам удалось идентифицировать PETN даже на фоне присутствующих интерферентов. Это представляется особенно важным шагом в направлении создания доступной и компактной системы standoff детектирования ВВ. Дальнейшие перспективы развития Active SI группа авторов из IAF связывает с развитием технологии ККЛ и в первую очередь – с повышением уровня мощности их излучения. Кроме того, обращается внимание на необходимость проведения работ, направленных на создание эффективных алгоритмов анализа изображений.

В работе [50] для standoff обнаружения остатков RDX (100 мкг) на стеклянных и металлических подложках была использована дифференциальная методика формирования спектроскопического изображения (Differential Spectroscopic Imaging). Источниками излучения с изменяемым набором длин волн служили два CO<sub>2</sub>-лазера. Длина волны излучения одного из них (9.62 мкм) находилась в пределах линии поглощения RDX, другого – вне ее (9.25 и 9.27 мкм). Исследуемый объект поочередно подвергался воздействию лазерного излучения на указанных длинах волн (так называемые on- и off-absorption режимы облучения). При этом нормированное разностное изображение объекта получали в виде отношения разности и суммы сигналов, регистрируемых в этих режимах облучения (способ отношений). Такой способ позволяет «вычистить» сигнал, образуемый нежелательным излучением фона или помехи. Необходимо отметить, что и в этой работе авторы особое внимание уделили вопросу устранения влияния эффектов интерференции и дифракции на качество спектроскопического изображения, предлагая решить эту проблему за счет статистического усреднения большого числа изображений.

В более поздней работе [51] приведены результаты исследований, связанных со standoff обнаружением остатков RDX на подложке из алюминия при использовании техники получения гиперспектральных изображений в активном режиме. Для этого были применены перестраиваемый ККЛ с внешним резонатором и ИК камера с неохлаждаемой матрицей микроболометров. Формат матрицы составлял 340 × 240 пикселей, размер одного пикселя – 47 мкм, спектральная область чувствительности находилась в диапазоне 7.5 – 13 мкм. Изготовленный в лабораторных условиях квазинепрерывный ККЛ работал на частоте 100 кГц с 50%-ным рабочим циклом. Частота излучения лазера перестраивалась в интервале 1102.95 – 983.8 см<sup>-1</sup> с шагом 2 см<sup>-1</sup>. При этом время формирования гиперкуба, содержащего 60 изображений, составляло ~2 с и ограничивалось частотой кадров ИК камеры, равной 30 Гц. По утверждению авторов [51], это время может быть меньше одной секунды без ухудшения спектрального разрешения. Средняя мощность излучения на пике перестроечной кривой составляла 5 мВт. Детектирование ВВ осуществлялось на расстоянии ~4.2 м от мишени путем воздействия на нее коллимированного лазерного пучка, диаметр пятна которого на объекте составлял ~2.5 см. Средняя поверхностная плотность остатков ВВ, по оценкам авторов, была равна 100 мкг/см<sup>2</sup>. При этом, как видно из приведенных в работе [51] снимков, распределение ВВ по поверхности образца характеризуется заметной неоднородностью.

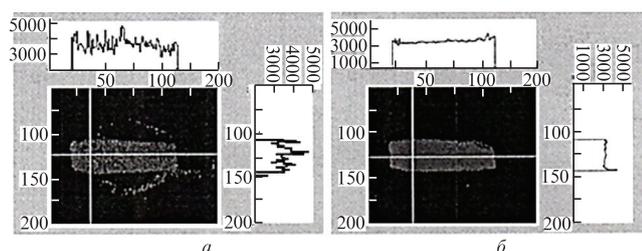


Рис.7. Спекл-шум на изображении (а) и результат его устранения (б) [35].

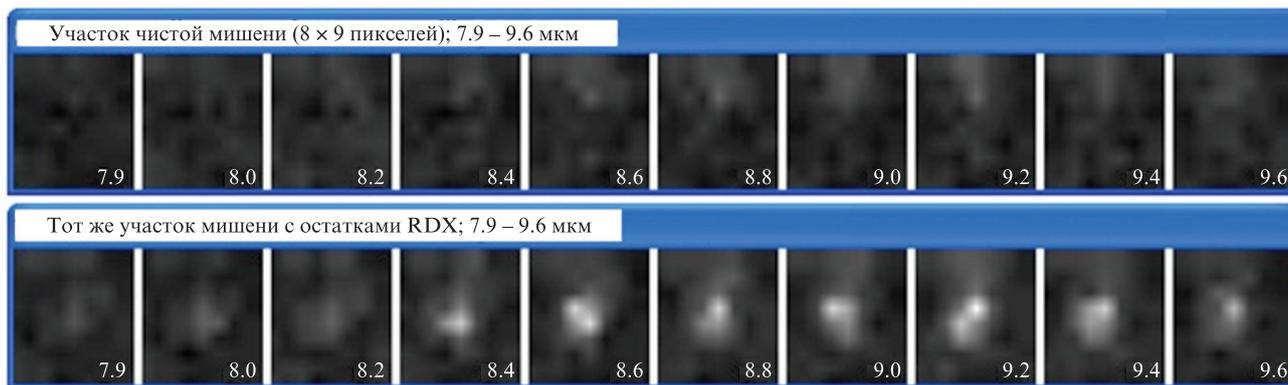


Рис.8. Серия полученных на различных длинах волн изображений остатков RDX [29].

Важным достоинством работы является демонстрация возможности идентификации RDX с помощью коммерческого пакета программ (ПП) ENVI, используемого для анализа полученных в пассивном режиме мультиспектральных и гиперспектральных изображений [28]. При этом рассматривались различные алгоритмы анализа гиперспектральных изображений, включенные в ПП ENVI, такие, например, как согласованная фильтрация (Matched Filtering) и фильтрация спектральных признаков (Spectral Feature Filtering). По мнению авторов [51], наилучший результат в распознавании исследуемых остатков RDX был получен при использовании линейной фильтрации спектральных признаков. В частности, применение этого алгоритма позволяет эффективно подавлять спекл-шум за счет статистического подхода к обработке и анализу изображений.

Авторы [51] считают рассматриваемую технологию перспективной для standoff детектирования остатков ВВ на поверхности тел для среднего диапазона расстояний до мишени в силу простоты ее реализации, доступности элементной базы и низкой вероятности ложных срабатываний.

Техника формирования гиперспектральных изображений в активном режиме была использована также в работе [29] для обнаружения остатков RDX на поверхности подложки из нержавеющей стали. Заслуживает внимания тот факт, что в своих исследованиях авторы использовали коммерческие перестраиваемый ККЛ с внешним резонатором (Daylight Solutions) и ИК камеру с неохлаждаемой матрицей микроболометров (Sierra Pacific Innovation Corp., модель RAZ-IR SX). Перестройка длины волны излучения лазера осуществлялась в пределах 7.9 – 9.7 мкм с шагом 200 нм (10 длин волн). Длительность импульса составляла 500 нс при частоте их следования 74.9 кГц. Пиковая мощность излучения в импульсе достигала 400 мВт. Диаметр выходного пучка составлял 4 мм при расходимости 4 мрад. Что касается характеристик ИК камеры, то формат FPA матрицы составлял 160 × 120 пикселей при размере чувствительного элемента 35 мкм. Диапазон спектральной чувствительности камеры находился в пределах 8 – 14 мкм, поле зрения камеры было равно 25° × 19° при фокусном расстоянии объектива 12.6 мм. Чувствительность камеры не превышала 120 мК.

Методики измерений, анализа и обработки полученных в [29] изображений несколько отличались от описанных ранее и заключались в следующем. Тонкий слой RDX наносился на подложку из раствора и покрывал на

ней область площадью  $\sim 1 \text{ см}^2$ . При этом поверхностная плотность ВВ составляла  $\sim 20 \text{ мкг/см}^2$ . Образец находился на расстояниях 3 м от лазера и 1.5 м от ИК камеры, расположенной под углом  $10^\circ$  к направлению распространения лазерного пучка. Массив гиперспектральных изображений области, содержащей ВВ, получался путем формирования в ИК камере «монохромных» изображений сцены при воздействии на мишень лазерным излучением на десяти различных длинах волн. Извлеченная из полученного массива данных (рис.8) спектральная характеристика яркости облучаемой области представлена на рис.9. При этом кривая изменения яркости нормирована и масштабирована так, чтобы стало возможным ее сравнение со спектром пропускания RDX, измеренным с помощью ИК фурье спектрометра (FTIR). С учетом зависимости мощности лазера от длины волны излучения приведенные на рис.9 standoff данные достаточно хорошо коррелируют с эталонным спектром пропускания. При этом авторы отмечают, что в отсутствие RDX изменение яркости в рассеянном чистой подложкой излучении не наблюдается. Полученный результат легко понять, если учесть, что при лазерном облучении образца имеет место как поглощение излучения, так и его рассеяние. Причем соотношение между их эффективностями является функцией длины волны. С увеличением поглощения яркость изображения должна уменьшаться, т.к. уменьшается интенсивность рассеянного излучения, регистрируемого камерой. И наоборот, с уменьшением поглощения возрастает интенсив-

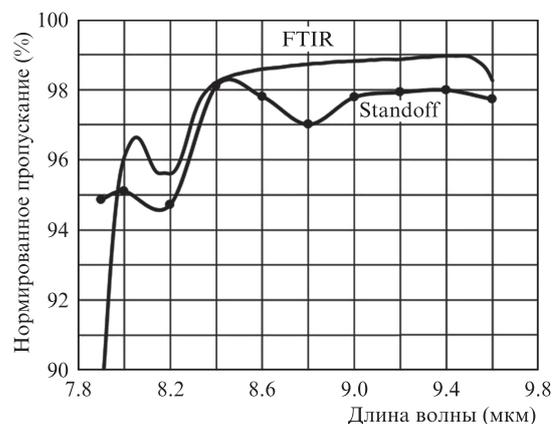


Рис.9. Нормированный спектр пропускания RDX (сплошная кривая) и зависимость яркости изображения остатков ВВ от длины волны излучения (точки) [29].

ность рассеянной компоненты, что проявляется в увеличении яркости изображения (рис.8).

Результаты работы [29] свидетельствуют о том, что рассматриваемая техника позволяет создавать компактные устройства для standoff детектирования следовых остатков ВВ на расстояниях ~10 м и более. При этом используемый подход (Active SI) делает возможным получение информации о локализации остатков ВВ на объекте, что принципиально отличает его от всех известных standoff методов обнаружения следов ВВ. Очень важно, что этот метод позволяет производить досмотр объекта заметной площади, т. к. его облучение осуществляется широким пучком света, а поле зрения камеры позволяет наблюдать всю облучаемую область.

Развиваемый в работах [34, 52] подход к дистанционному обнаружению остатков ВВ с использованием технологии SI отличается от описанных выше и основан на измерении коэффициента отражения взрывчатых веществ в безопасном для глаз диапазоне длин волн 1500–1800 нм, который попадает в одно из окон прозрачности атмосферы. В этой области спектра отраженное ИК излучение доминирует над тепловым, поэтому контраст отдельных участков объекта будет обусловлен изменениями его оптических свойств в указанном спектральном диапазоне.

Поглощение излучения взрывчатыми веществами в рассматриваемой области спектра происходит на частотах, соответствующих обертонам молекулярных колебаний. При этом вероятность перехода даже для первого обертона на порядок ниже вероятности основного перехода. Как видно из рис.10, спектральные зависимости коэффициента отражения ВВ в ближнем ИК диапазоне спектра также имеют характерные особенности. Эти особенности достаточно размыты и занимают существенно больший спектральный интервал, чем в среднем ИК. Тем не менее их наличие делает возможным обнаружение ВВ на фоне присутствующих интерферентов (рис.11) [52].

Для реализации SI технологии в работе [34] предлагается оригинальное твердотельное сенсорное устройство, которое выполнено в виде единой монолитной конструкции, включающей в себя не охлаждаемую фотоматрицу на основе InGaAs, твердотельный интерферометр Фабри–Перо и микросхему для считывания и обработки сигналов чувствительных элементов. При этом все элементы (пиксели) фотоматрицы состоят из группы субпикселей, каждый из которых настраивается на поглощение излучения с определенной длиной волны. Относительные отк-

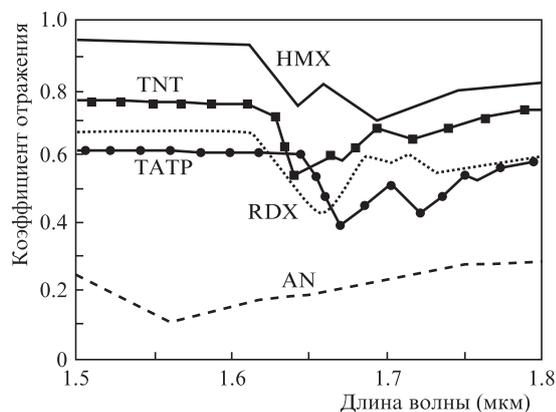


Рис.10. Спектральные зависимости коэффициентов отражения ряда ВВ в ближнем ИК диапазоне спектра [34, 52] (AN – нитрат аммония, TATP – триацетон трипероксид).

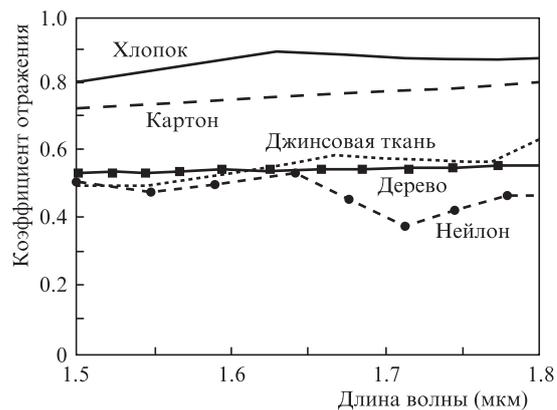


Рис.11. Спектральные зависимости коэффициентов отражения характерных интерферентов в ближнем ИК диапазоне спектра [34, 52].

лики от каждого из субпикселей сравниваются со спектральными характеристиками ВВ в ближнем ИК диапазоне, что служит основой для их обнаружения и локализации в пределах отображаемой сцены даже при наличии интерферентов.

Малые габариты сенсора, нечувствительность к вибрациям и небольшая потребляемая мощность (менее 3 Вт), по мнению авторов [34], во многом определяют возможность его применения в переносном или компактном стационарном устройстве, устанавливаемом для ведения постоянного надзора (досмотра) в местах скопления людей или на контрольно-пропускных пунктах. Устройство позволяет вести наблюдение как в пассивном, так и в активном режиме. В ночное время суток, а также при недостатке солнечного света устройство может быть снабжено перестраиваемым источником излучения или несколькими источниками, излучающими на разных длинах волн. Для случая работы рассматриваемого сенсора в пассивном режиме авторы [34] сделали ряд оценок ожидаемых параметров. Так, с помощью предлагаемого устройства в режиме реального времени можно будет детектировать остатки ВВ (300 нг) на расстоянии 10 м при диаметре собирающей оптики ~32 см. При этом вероятность обнаружения составит ~90%, а вероятность ложной тревоги не превысит 10%. Следует ожидать, что в активном режиме работы чувствительность и селективность сенсора только возрастут. Тем не менее, в силу относительно высокой вероятности ложного срабатывания, сенсоры, работающие в ближнем ИК диапазоне спектра, по всей видимости, смогут играть лишь вспомогательную роль в системах обнаружения ВВ, например на этапе предварительного просмотра сцены.

При этом следует иметь в виду, что создание портативных устройств для standoff детектирования следов ВВ на основе активного метода формирования изображений в безопасном для глаз диапазоне длин волн 1500–1800 нм может встретить затруднения чисто технического характера. Это связано с отсутствием полупроводниковых лазеров со столь широкой полосой перестройки (рис.10, 11). Применение же нескольких перестраиваемых полупроводниковых лазеров заметно усложнит конструкцию всей системы. Что касается работающих в этом диапазоне длин волн параметрических генераторов света, то они представляют собой достаточно дорогостоящие и сложные для массового производства изделия, технические параметры которых (например, ширина линии генерации, габариты и энергопотребление) требуют улучшения [53].

#### 4.2. ИК фототермическое изображение при резонансном воздействии на объект

Возможность дистанционного обнаружения следов ВВ (TNT и RDX) с помощью формирования и анализа изображения объекта в спектре испускаемого телом теплового излучения впервые была продемонстрирована в [39–41]. В рассматриваемом методе лазерное излучение с длиной волны, попадающей в область сильного поглощения анализируемого вещества, направляется на поверхность исследуемого объекта. Вследствие резонансного поглощения вещество нагревается, а участки поверхности, свободные от него, – нет. Это приводит к появлению температурного контраста между отдельными деталями сцены, наблюдаемой с помощью теплового приемника.

В экспериментах использовался коммерческий ККЛ (Daylight Solutions) с диапазоном непрерывной перестройки длин волн 6.1 – 6.4 мкм. В непрерывном режиме мощность лазера составляла до 30 мВт при ширине линии генерации  $\sim 1 \text{ см}^{-1}$ . Выбор области перестройки ККЛ был обусловлен следующими причинами. С одной стороны, длина волны излучения должна попадать в узкое окно, в котором влажный воздух относительно прозрачен. Выполнение этого требования необходимо для обнаружения следовых остатков ВВ в реальных условиях на значительных (более 100 м) расстояниях [41, 42]. С другой стороны, исследуемые ВВ в этой спектральной области обладают большим поглощением, обусловленным связью N–O. Фототермический сигнал регистрировался с помощью ИК камеры, снабженной светосильным объективом с фокусным расстоянием  $f = 100 \text{ мм}$  ( $f/1$ ) и матрицей неохлаждаемых микроболометров с чувствительными элементами из окиси ванадия (FLIR Inc.,  $320 \times 240$  пикселей, размер пикселя 38 мкм, NETD = 85 мК, 30 кадров в секунду). Между линзой и матрицей размещался фильтрующий элемент, обеспечивающий регистрацию фототермического сигнала в спектральной области 8–12 мкм, тем самым отсекая рассеянное лазерное излучение.

На рис.12,а показано «необработанное» тепловое изображение частиц TNT, находящихся на подложке из нержавеющей стали. Разностное изображение той же сцены (рис.12,б), позволяющее устранить мешающий обнаружению ВВ посторонний фон, получалось путем вычитания изображения, полученного перед облучением исследуемого объекта, из его изображения при лазерном нагреве. Изображение получено на расстоянии 1 м с использованием лазера с длиной волны излучения 6.25 мкм и средней мощностью 20 мВт. Диаметр лазерного пучка на мишени составлял  $\sim 10 \text{ мм}$ . Авторы [40] утверждают, что на снимке различаются отдельные частицы TNT размером 10 – 100 мкм (0.8 – 800 нг).

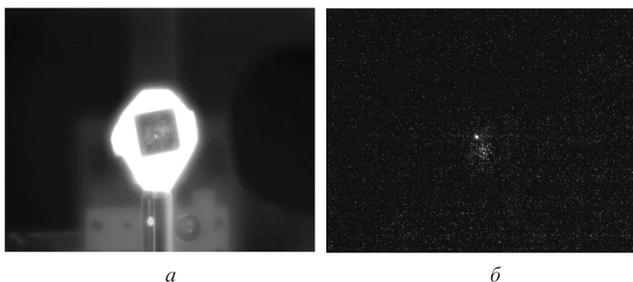


Рис.12. Тепловые «необработанное» (а) и разностное (дифференциальное) (б) изображения частиц TNT [40].

Помимо высокой чувствительности метода, в работах [40, 41] демонстрируется его высокая селективность. Она достигается за счет применения мультиспектрального подхода, когда объект подвергается воздействию излучения ККЛ, длина волны генерации которого настраивается на характерный для анализируемого химического соединения резонанс. В частности авторы [38–40] показали, что метод позволяет уверенно различать такие исследуемые в работе ВВ, как TNT и RDX. По оценке авторов, в лабораторных условиях ими достигнута чувствительность детектирования TNT, составляющая  $\sim 100 \text{ нг}$  при расстоянии до мишени 4 м.

Из сказанного следует, что резонансная ИК фототермическая спектроскопия позволяет в безопасном для глаз диапазоне спектра скрытно осуществлять селективный нагрев анализируемого вещества и идентифицировать его. Используя несколько длин волн излучения, находящихся как в резонансе с линией поглощения материала, так и вне его, можно успешно решить задачу, связанную с идентификацией ВВ в многокомпонентной среде. В [40] отмечено, что развитие обсуждаемой технологии непосредственно связано с прогрессом в области улучшения параметров ККЛ лазеров. В первую очередь это касается повышения мощности излучения лазеров, расширения области и полосы перестройки частоты генерации в среднем ИК диапазоне спектра. Кроме того, обращается внимание на необходимость проведения работ, направленных на создание надежных алгоритмов анализа и распознавания изображений.

#### 4.3. Рамановские гиперспектральные изображения

В работах [43, 44] предложена новая концепция standoff детектирования ВВ, которая сочетает в себе спектроскопию индуцированного лазерным излучением пробоя (LIBS) и формирование гиперспектрального изображения в рамановском спектре рассеянного излучения. Такая комбинация, по мнению авторов, должна обеспечить высокую чувствительность и низкий уровень ложной тревоги при детектировании и идентификации остатков ВВ на поверхности тел.

Сенсорное устройство работает в двух режимах обнаружения: в пассивном режиме непрерывного наблюдения и в режиме идентификации. В режиме наблюдения получают гиперспектральные изображения исследуемого объекта в ближнем ИК диапазоне спектра при его обзоре в широком поле зрения. На этом предварительном этапе на объекте досмотра выявляются потенциально опасные зоны, которые в дальнейшем исследуются в режиме идентификации – подвергаются анализу методами спектроскопии лазерно-индуцированного пробоя и формирования гиперспектрального изображения в рамановском спектре. Полученные при этом данные используются для принятия решения.

В целом система детектирования ВВ находится на стадии разработки. Поэтому основное внимание в [43] уделено отдельному вопросу – получению гиперспектрального изображения смеси веществ в рамановском спектре. Для этого рассеянное мишенью излучение через волоконно-оптический кабель поступает на вход спектрометра, выделяющего рамановскую составляющую спектра рассеянного излучения, которая регистрируется с помощью снабженной усилителем яркости ПЗС-матрицы. Исследуемая смесь состоит из сульфата кальция ( $\text{CaSO}_4$ ), являю-

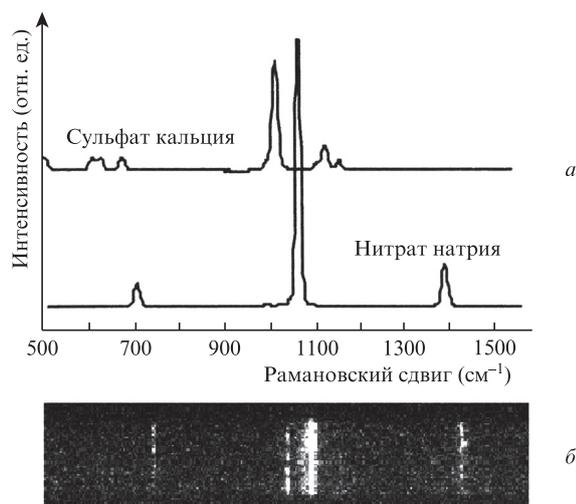


Рис.13. Рамановские спектры составляющих исследуемой смеси (а) и экспериментальный рамановский спектр смеси, зарегистрированный с помощью ПЗС-матрицы (б) [43].

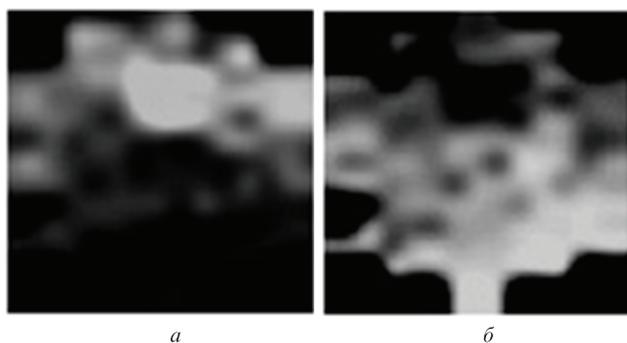


Рис.14. Гиперспектральные изображения, полученные в рамановском спектре  $\text{CaSO}_4$  ( $1012 \text{ cm}^{-1}$ ) (а) и  $\text{NaNO}_3$  ( $1081 \text{ cm}^{-1}$ ) (б) [43].

щегося «фоном», и нитрата натрия ( $\text{NaNO}_3$ ) – взрывчатого вещества, подлежащего обнаружению и идентификации. На рис. 13 представлены рамановские спектры для каждого из компонентов смеси и полученные в месте расположения ПЗС-матрицы изображения отдельных линий. Восстановленные по ним гиперспектральные изображения представлены на рис. 14. Видно, что внешне схожие компоненты смеси хорошо различимы. По мнению авторов [43], полученные результаты подтверждают предположение о том, что разрабатываемое комбинированное сенсорное устройство будет обладать высокими чувствительностью и селективностью при детектировании в реальных условиях остатков ВВ на поверхностях тел. К сожалению, никаких данных о параметрах используемой в работе аппаратуры, а также о пределах обнаружения и расстояниях до объекта в этой работе не приводится.

В более поздней работе [54] был развит мультиспектральный подход к визуализации частиц ВВ в спектре рамановского рассеяния. Продемонстрирована возможность обнаружения и идентификации остатков DNT (динитротолуол) и TNT на расстоянии 12 м и их отображение с помощью цветового кодирования. Достигнутое пространственное разрешение на длине волны 546 нм составляло 70 мкм. При этом время детектирования варьировалось от одной до пяти минут в зависимости от типа и размера

частиц. По утверждению авторов, полученные результаты демонстрируют большие возможности метода формирования мультиспектральных изображений в рамановском спектре для standoff обнаружения частиц ВВ на поверхностях тел.

## 5. Выводы

Проведенный анализ литературных данных не оставляет сомнений в том, что техника активного формирования спектральных изображений (Active Spectral Imaging) представляет несомненный интерес для решения задач, связанных с дистанционным обнаружением следовых остатков ВВ на поверхностях тел и с их идентификацией в многокомпонентной среде. Во многом этому способствует тот факт, что ряд вопросов в этой технике уже хорошо отработан, т.к. их решение заимствовано из известной технологии Spectral Imaging, получившей мощное развитие в связи с мониторингом земной поверхности из космоса.

Соединение технологии SI с перестраиваемыми ККЛ, перспективы увеличения мощности их излучения [55], а также доступность элементной базы и простота реализации вселяют надежду, что портативные переносные устройства будут созданы уже в ближайшем будущем. Дальность действия таких устройств, работающих в режиме реального времени, следует ожидать равной нескольким десяткам метров при низкой вероятности положительной ложной тревоги (positive false alarm, PFA [8]) [51]. Оценивая дальность обнаружения, мы исходили из детектирования ВВ, составляющего  $\sim 10 \text{ мкг/см}^2$ , что примерно соответствует количеству ВВ, оставляемых на поверхности отпечатком пальца [7].

Одним из недостатков метода является необходимость применения мощного программного обеспечения, способного в режиме реального времени обрабатывать большие массивы данных. Решение этого технического вопроса, повышение мощности излучения перестраиваемых ККЛ (средняя мощность излучения  $\sim 1 \text{ Вт}$ ), а также снижение их стоимости позволяют этой технологии стать основой компактных переносных устройств с дальностью действия  $\sim 10 \text{ м}$  и более, приоритетной задачей которых может стать досмотр персонала, багажа и транспортных средств. При этом обращается внимание на необходимость продолжения исследований, связанных с созданием эффективных алгоритмов анализа изображений и пополнением библиотеки спектров как самих ВВ, так и их возможных интерферентов [38, 40, 51]. Что касается метода формирования мультиспектральных изображений в рамановском спектре, то вследствие малого сечения комбинационного рассеяния он требует значительных затрат времени на детектирование ВВ.

Определенный интерес представляет создание комбинированных систем для standoff анализа. Например, положительный результат может дать совмещение в одном устройстве пассивного и активного SI методов [43]. Действительно, предварительный осмотр объекта в пассивном режиме обеспечивает большой угол обзора, что позволяет выделить на объекте досмотра область (пиксель или группу пикселей), вызывающую подозрение, которая в дальнейшем исследуется уже в активном режиме. При этом исследование объекта в разных спектральных диапазонах (например, в ближнем и среднем ИК) приведет только к увеличению информации о нем и к уменьшению вероятности ложной тревоги.

К достоинствам рассматриваемой техники следует также отнести возможность обзора больших площадей при обеспечении пространственного разрешения областей локализации ВВ на объекте досмотра, что практически недоступно для всех известных лазерных методов без существенных потерь в производительности. Последнее обстоятельство связано с тем, что в рассматриваемых методах возможно использование коллимированного лазерного пучка до нескольких сантиметров в диаметре [50, 51]. При этом увеличить область досмотра можно либо за счет перемещения лазерного пучка по объекту при непрерывном повороте всего устройства, либо за счет применения системы сканирования пучка. Имеется лишь небольшое число работ, в которых этому вопросу уделяется внимание. Так, в [56] использовалось быстродействующее электромеханическое сканирующее устройство, обеспечивающее возможность исследования области размером  $\sim 1 \text{ м}^2$  на расстоянии  $\sim 20 \text{ м}$ . В то же время в [57] исследовалась возможность применения для этой цели работающего в ближнем ИК диапазоне спектра акустооптического дефлектора (электронное сканирование) с углом сканирования  $4 \times 10^{-2}$  рад по каждой из координат.

Автор выражает глубокую благодарность Е.М. Максимова за постоянный интерес к работе и ее обсуждение.

## 6. Литература

- Kaur-Atwal G., O'Connor G., Aksenov A.A., Bosoc-Bintintan V., Thomas C., Creaser C. *Int. J. Ion Mobility Spectrom.*, **12**, 1 (2009).
- Clowers B.H., Siems W.F., Hill H.H., Massik S.M. *Anal. Chem.*, **78**, 44 (2006).
- Barry E.F., Grob R.L. *Modern Practice of Gas Chromatography* (New York: Wiley-Interscience, 2004).
- Buryakov I.A. *J. Chromatography B*, **80**, 75 (2004).
- Steinfeld J.I., Wormhoudt J. *Ann. Rev. Phys. Chem.*, **49**, 203 (1998).
- Phares D.J., Holt J.K., Smedley G.T., Flagan R.C. *J. Forensic Sci.*, **45**, 774 (2000).
- Gresham G.L., Davies J.P., Goodrich L.D., Blackwood L.G., Liu B.Y.H., Thimsen D., Yoo S.H., Hallowell S.F. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2276**, 34 (1994).
- Committee on the Review of Existing and Potential Standoff Explosives Detection Techniques, National Research Council. *Existing and Potential Standoff Explosives Techniques* (Washington, DC: National Acad. Press, 2004).
- Wallin S., Pettersson A., Ostmark H., Hobro A. *Anal. Bioanal. Chem.*, **395**, 259 (2009).
- Petric M. *Appl. Spectroscopy Rev.*, **42**, 287 (2007).
- Munson C., Gottfried J., De Lucia F., McNesby K., Miziolek A. *Laser-based Detection Methods of Explosives* (Amsterdam: Elsevier, 2007).
- Willer U., Schade W. *Anal. Bioanal. Chem.*, **395**, 275 (2009).
- Скворцов Л.А., Максимов Е.М. *Квантовая электроника*, **40** (7), 565 (2010).
- Gottfried J., De Lucia F., Munson C., Jr., Miziolek A. *Anal. Bioanal. Chem.*, **395**, 283 (2009).
- Wynn C., Palmacci S., Kunz R., Rothshild M. *Lincoln Laboratory J.*, **17** (2), 27 (2008).
- Phillips C., Ho N. *Opt. Express*, **16** (3), 1836 (2008).
- Le H., Wang Y. *Sensors*, **10**, 544 (2010).
- Wang Yi, Wang Yang, Le Han. *Opt. Express*, **13** (17), 6572 (2005).
- Nischan M., Joseph R., Libby J., Kerekes J. *Lincoln Laboratory J.*, **14** (1), 131 (2003).
- Clarke R. *Active Multispectral Imaging, 2004*, <http://www.emrsdtc.com>.
- Landgrebe D. *Information Processing for Remote Sensing* (River Edge, NJ: World Sci. Publ. Comp., 1999, pp 3–38).
- Smith, R.B. *Introduction to Hyperspectral Imaging with TMIPS*, 2006, <http://www.microimages.com>.
- Hyper & Multi-spectral Imaging*. <http://www.atcourses.com>.
- Christopher M. Gittins, William J. Marinelli. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3533**, 3533-13 (1998).
- Harig, R., Matz, G., Rusch P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4574**, 83 (2002).
- Еремеев В.А., Мордвинцев И.Н., Платонов Н.Г. *Исследование Земли из Космоса*, № 6, 80 (2003).
- Cloutis, E.A. *Internat. J. Remote Sensing*, **17**, 2215 (1996).
- ENVI Tutorial*, <http://www.itvis.com>.
- Morales-Rodriguez M.E., Senesac L.R., Thundat T., Rafailov M.K., Datskos P.G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **8031**, 80312D (2011).
- Glenar D.A., Hillman J.J., Saif B., Bergstralh J. *Appl. Opt.*, **33**, 7412 (1994).
- Naum Gat. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4056**, 50 (2000).
- Schau H. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7304**, 730414 (2009).
- Blake T., Kelly J., Gallagher N., Gassman P., Jonson T. *Anal. Bioanal. Chem.*, **395**, 337 (2009).
- Onat B., Carver G., Itzler M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7310**, 731004 (2009).
- Hinkov B., Fuchs F., Kaster J., Yang Q., Aidam R., Köler K. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7484**, 748406 (2009).
- Fuchs F., Hinkov B., Wild C., Yang Q., Bronner W., Köler K., Wagner J. <http://www.iaf.fraunhofer.de>.
- Fuchs F., Hinkov B., Hugger S., Kaster J., Aidam R., Bronner W., Köler K., Yang Q., Rademacher S., Degreif K. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7608**, 760809 (2010).
- Degreif K., Rademacher S., Dasheva P., Fuchs F., Hugger S., Schnürer F., Schweikert W. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7945**, 79450P-1 (2011).
- McGill R.A., Kendziora C.A., Furstenberg R., Papantonakis M.R., Horwitz J., Hubler G.K. US Patent Application 12/255, 103; Field Oct. 21, 2008.
- Furstenberg R., Kendziora C., Stepanowski S. V., Stepanowski J., Rake M., Papantonakis M.R., Nguyen V., Hubler G.K., McGill R.A. *Appl. Phys. Lett.*, **93** (22), 224103 (2008).
- Papantonakis M.R., Kendziora C., Furstenberg R., Stepanowski S. V., Rake M., Stepanowski J., McGill R.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7304**, 730418-9 (2009).
- Mukherjee A., Porten S., Patel C.K.N. *Appl. Opt.*, **49**, 2072 (2010).
- Wentworth R.M., Neiss J., Nelson M.P., Treado P.J. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium* (Honolulu, 2007, Vol. 1, p. 4925).
- Treado P., Nelson M., Schweitzer R., Gardner C., Wentworth R. *Laser Applications to Chemical, Security and Environmental Analysis (LACSEA)* (St. Petersburg, Florida, 2008).
- Wold S., Esbensen K., Geladi P. *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, **2**, 37 (1987).
- Baronti S., Casini A., Lotti F., Porcinai S. *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, **39**, 103 (1997).
- Kazianka H., Leitner R., Pilz J. *Segmentation and Classification of Hyper-Spectral Skin Data* (Berlin: Springer, 2008, p. 242).
- Shah C., Arora M., Pramod K. Varshney. *Int. J. Remote Sensing*, **25** (2), 481 (2004).
- Westervelt R., Abarbanel H., Garwin R., Jeanioz R., Kimbel J. *Imaging Infrared Detectors II* (Virginia: McLean, 2000).
- Bernacki B., Ho N. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6945**, 694517 (2008).
- Bernacki B., Phillips M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7665**, 76650I (2010).
- Klunder G. *Stand-off Detection of High Explosives with Near Infrared Spectroscopy, FACSS Conf.* (Lake, Duena Vista, FL, 2006).
- Гулевич Е., Кондратюк Н., Протасеня А. *Фотоника*, № 3, 30 (2007).
- Nordberg M., Åkeson M., Östmark H., Carlsson T. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **8017**, 80171B (2011).
- Bonetti Y., Faist J. *Nature Photon.*, **3**, 32 (2009).
- Malcolm G., Marker G., Robertson M., Dunn M., Stothard D. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7486**, 7486H (2009).
- Скворцов Л.А., Кириллов В.М. *Квантовая электроника*, **37**, 1076 (2007).