

## **ФОТОЯДЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СКРЫТЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ**

*Описан метод фотоядерного детектирования скрытых взрывчатых веществ. Даны расчетные характеристики детекторов и возможные схемы их конструктивного исполнения. Приведены результаты экспериментов, полученные на прототипе устройства поиска. Показано, что установки, основанные на фотоядерном методе, по совокупному критерию чувствительность-быстродействие-достоверность обнаружения значительно превосходят устройства, используемые для этих целей в настоящее время, и могут с успехом использоваться для досмотра багажа авиапассажиров и в акциях по гуманитарному разминированию.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время существует две крупных социально-значимых проблемы, которые связаны с поиском скрытых взрывчатых веществ (СВВ) - это обеспечение безопасности авиаперевозок и гуманитарное разминирование.

Сейчас для досмотра багажа авиапассажиров во всем мире основным техническим средством являются рентгеновские интроскопы. Но эти приборы непосредственно не реагируют на присутствие ВВ и решение о наличии в досматриваемом багаже подозрительных объектов, в конечном счете, принимается оператором на основе его субъективной оценки полученного изображения. В результате даже при использовании самых совершенных установок, строящих 3D-изображение, ведущих т.н. Z-анализ и стоящих больше миллиона долларов, с помощью интроскопов не удается обеспечить требуемый уровень безопасности авиаперевозок, следствием чего является повсеместный запрет на провоз в багаже любых жидкостей и необходимость ручного досмотра сложной электротехнической и электронной техники. К сожалению, разрабатываемые на протяжении десятилетий приборы прямого обнаружения СВВ, основанные на других методиках таких, например, как анализ паров ВВ, регистрация микрочастиц ВВ, нейтронные технологии, ядерный магнитный или квадрупольный резонанс, либо не вышли из стадии НИР, либо не обладают достаточным быстродействием и могут применяться лишь как вспомогательные средства при выборочном досмотре.

Проблема поиска СВВ напрямую связана и с проблемой гуманитарного разминирования. По оценкам ООН, сейчас в 80 странах по всему миру установлено не менее 100 – 120 миллионов противопехотных мин. В результате ежемесячно жертвами этих мин становятся сотни людей, и, кроме того, риск подрыва приводит к тому, что огромные территории выводятся из хозяйственного оборота, что крайне негативно сказывается на экономике.

Эта проблема относится и к территориям России, и стран СНГ, где остались мины и боеприпасы со времен Великой Отечественной войны. По мнению экспертов МО на сегодняшний день на территории только 9 субъектов Российской Федерации требуют разминирования более 5400 км<sup>2</sup> земель [1]. Эта минная опасность возникла из-за того, что после окончания ВОВ глубина массового разминирования составляла 0,5 м и за прошедшие десятилетия из-за промерзания почвы не найденные тогда взрывоопасные предметы «всплыли» близко к поверхности.

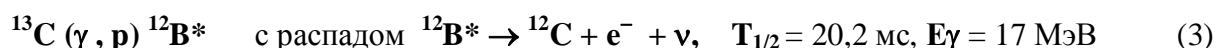
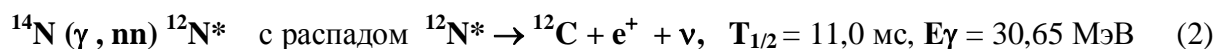
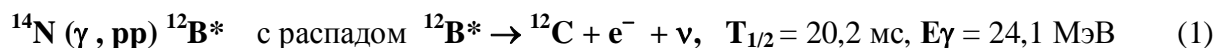
В последние годы ситуация, связанная с проведением в России гуманитарного разминирования, резко обострилась. По данным правительства Чеченской республики, в ней около 24 тыс. гектаров территории (большая часть – сельхозугодия) нуждаются в скорейшей очистки от взрывоопасных предметов (ВОП), от которых уже пострадали более 3 тысяч человек, из них 772 ребенка. Однако, несмотря на помощь федерального Правительства и привлечение лучших специалистов МЧС, темпы проведения работ оказываются явно неудовлетворительными, и полная очистка может затянуться на десятилетия [2]. Такое положение во многом связано с тем, что согласно Стандартам ООН для гуманитарного разминирования очистка территории должна проводиться на глубину 20 см с вероятностью удаления всех взрывоопасных предметов 99.6% [3]. Однако все существующие сегодня технические средства обнаружения и уничтожения ВОП не обеспечивают требуемого

качества очистки и основным методом разминирования продолжает оставаться крайне опасный и трудоемкий ручной метод, отличающийся крайне низкой производительностью.

Таким образом, суммируя, можно сделать вывод о необходимости развития новых технологий поиска СВВ, которые могли бы обеспечить значительное повышение качества досмотра багажа авиапассажира и принципиально изменить скорость проведения работ по гуманитарному разминированию.

### ФОТОЯДЕРНЫЙ МЕТОД ПОИСКА СВВ

Метод фотоядерного детектирования [4] состоит в регистрации продуктов распада короткоживущих изотопов  $^{12}\text{B}$  (бор-12) и  $^{12}\text{N}$  (азот-12), имеющих периоды полураспада соответственно  $T_{1/2} = 20,2$  и  $T_{1/2} = 11,0$  мс. Эти изотопы образуются в результате фотоядерных реакций на азоте и углероде, химических элементах, составляющих основу всех современных ВВ, при их облучении гамма-квантами с энергией большей порогового значения  $E_\gamma$ :



Выбор этих процессов в качестве реперных обеспечивает высокую чувствительность метода обнаружения ВВ, т.к. при облучении любых других химических элементов гамма-пучком с энергией меньше 55 МэВ не образуются никакие другие изотопы с периодом полураспада в диапазоне от 1 до 100 мс. Изотопы  $^{12}\text{B}$  и  $^{12}\text{N}$  являются  $\beta$ -активными и в процессе распада испускают электроны и позитроны с максимальной энергией  $\sim 13$  МэВ и  $\sim 17$  МэВ, которые, двигаясь в веществе, в свою очередь, индуцируют гамма-кванты. Эти гамма-кванты, так же как и аннигиляционные с энергией 511 КэВ, вместе с электронами и позитронами составляют вторичные продукты распада и могут быть зарегистрированы детектором. Следовательно, если облучить обследуемый объект коротким импульсом гамма излучения с энергией гамма-квантов выше пороговых значений  $E_\gamma$  для реакций 1-3, то в последующем за ним временном интервале  $\sim 20$  мс он откликнется, при наличии в нем достаточной концентрации азота и/или углерода, потоком вторичных частиц от распада изотопов  $^{12}\text{B}$  и  $^{12}\text{N}$ . В противном случае этого потока в измеряемый промежуток времени не будет. Это обстоятельство обеспечивает высокую чувствительность устройства обнаружения ВВ.

На рис.1 показана общая схема фотоядерного детектора СВВ, который работает следующим образом. Электронный пучок с энергией выше пороговых значений  $E_\gamma$  для реакций (1-3) из импульсного электронного ускорителя (1) с помощью тракта транспортировки (2) направляется на тормозную мишень. В тормозной мишени, представляющей собой танталовую пластинку толщиной  $\sim 1$  мм, энергия электронного пучка трансформируется в пучок гамма-излучения, которое, распространяясь в виде конуса, облучает некую зону на обследуемом объекте (4). После окончания импульса облучения, длящегося несколько мкс, «открывается» детектор вторичного излучения (5) на время  $\sim 20$  мс. Если в образце нет азота и/или углерода, то детектор в этом временном интервале регистрирует относительно слабое фоновое излучение. Если же будет зарегистрировано значительное увеличение интенсивности излучения-отклика, то это будет свидетельствовать об обнаружении вещества с высокой концентрацией азота и/или углерода, что будет указывать на вероятность присутствия в объекте ВВ.

По окончании цикла обследования выбранной зоны, с помощью магнита (3) направление электронного пучка изменяется, следующий импульс гамма излучения направляется на соседнюю зону и цикл поиска ВВ повторяется. Таким образом, осуществляется сканирующее обследование и удастся не только осуществить быстрый поиск ВВ, но и определить место его нахождения.

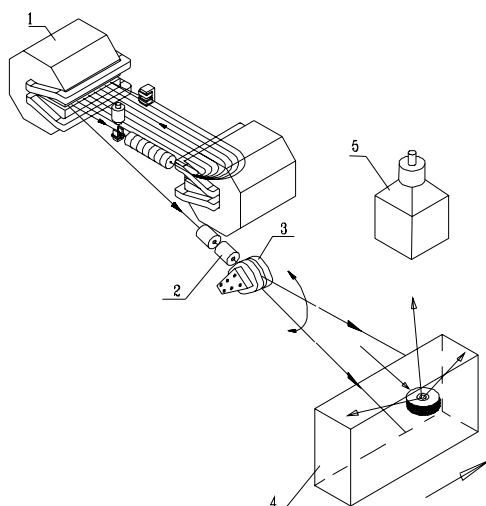


Рис.1. Общая схема фотоядерного детектора СВВ.

1 – электронный ускоритель, 2 – тракт транспортировки выведенного из ускорителя электронного пучка, 3 – тормозная мишень и магнит сканирования, 4 – досматриваемый объект, 5 – детектор вторичного излучения.

Успех реализации любого метода обнаружения СВВ во многом определяется его селективностью. При использовании фотоядерной методики наряду с «полезными» сигналами от ВВ возможно появление «ложных» сигналов от веществ, не являющихся ВВ, но содержащих азот или углерод. Особое значение подавление ложных срабатываний имеет в установках для досмотра багажа авиапассажира, когда источниками ложных сигналов могут быть различные объекты, содержащие, прежде всего углерод (полимерные материалы, натуральные ткани или пищевые продукты). При работе фотоядерного детектора в акциях по гуманитарному разминированию источниками ложных сигналов могут стать различные биологические объекты в почве и азотосодержащие удобрения.

То обстоятельство, что возникающие в ходе реакций 1-3 радионуклиды  $^{12}\text{В}$  и  $^{12}\text{N}$  имеют существенно разные периоды полураспада, открывает возможность проводить идентификацию облученных веществ [5]. Распадаясь, изотопы  $^{12}\text{В}$  и  $^{12}\text{N}$  формируют поток вторичного излучения, вид временной зависимости которого определяется периодами полураспада изотопов и их начальной относительной концентрацией. Поскольку времена жизни изотопов известны, то из анализа временного спектра сигналов с помощью относительно несложной математической процедуры можно определить значения начальной концентрации этих изотопов, которая в свою очередь однозначно связана с относительной концентрацией азота и углерода в облученном объекте, которую можно охарактеризовать значением некоторой величины, названной нами  $k$  - портретом. Значения  $k$ -портретов, полученные для различных веществ с помощью компьютерного

Таблица 1. Значения  $k$ -портретов.

Вещество	Химическая формула	$k$
<b>взрывчатые вещества</b>		
тротил	$\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3$	<b>0,71</b>
ТЭН	$\text{C}_5\text{H}_8\text{N}_4\text{O}_{12}$	<b>0,82</b>
тетрил	$\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_4\text{NCH}_3$	<b>0,80</b>
гексоген	$\text{N}_3(\text{NO}_2)_3(\text{CH}_2)_3$	<b>0,92</b>
октоген	$\text{N}_4(\text{NO}_2)_4(\text{CH}_2)_4$	<b>0,92</b>
<b>ложные объекты</b>		
древесина	---	<b>0,03</b>
нитрон	$(\text{CH}_2\text{CHCN})_n$	<b>0,66</b>
нейлон	$(\text{CO}(\text{CH}_2)_4\text{CONH}(\text{CH}_2)_6\text{NH})_n$	<b>0,33</b>
капрон	$(\text{NH}(\text{CH}_2)_5\text{CO})_n$	<b>0,49</b>
мыло-Na	$\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COONa}$	<b>0,00</b>

моделирования, представлены в Табл.1. Приведенные в таблице данные наглядно демонстрируют высокую эффективность предложенной методики, позволяющей не только надежно отделить сигналы от ВВ от сигналов от «ложных» объектов, содержащих азот и/или углерод, но и идентифицировать конкретный тип обнаруженного ВВ.

Суммируя все вышесказанное и основываясь на особенностях регистрируемых детектором процессов можно сделать вывод о том, что фотоядерный детектор будет обладать следующими достоинствами:

- Высокой «проникающей способностью» обусловленной тем, что зондирующий сигнал и сигнал-отклик переносятся гамма-квантами, обладающими высокой проникающей способностью;
- Высоким быстродействием, поскольку результат обследования облученной зоны можно получить через 0.02 с;
- Возможностью реализации режима сканирования, позволяющего определить точное местоположение ВВ;
- Возможностью полной автоматизации процедуры обнаружения;
- Низкой вероятностью появления «ложных» сигналов из-за возможности идентификации веществ по химическому составу.

**ФОТОЯДЕРНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ СВВ**

Для подробного исследования процессов связанных с фотоядерным детектированием СВВ был разработан специальный программный комплекс, с помощью которого методом Монте-Карло последовательно моделировалось прохождение первичного гамма-излучения через скрывающее вещество, взаимодействие излучения с азот- и/или углерод- содержащим объектом, выход вторичного излучения через слой скрывающего вещества и его регистрация детектором вторичного излучения. Использование этого программного комплекса позволило найти оптимальные параметры основных узлов детекторов СВВ, определить их эксплуатационные характеристики и приступить к разработке конструкции установок.

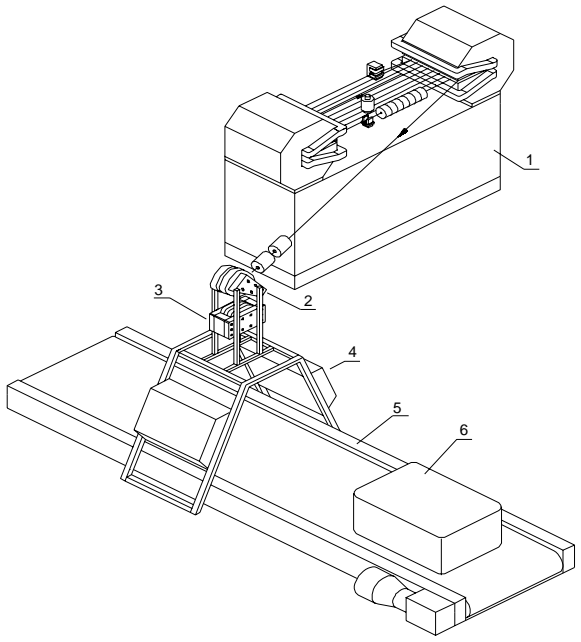


Рис.2. Общий вид стационарного фотоядерного детектора СВВ.  
 1 – электронный ускоритель, 2 – тракт транспортировки электронного пучка, 3 – магнитная система сканирования, 4 – детектор вторичного излучения, 5 – устройство транспортировки багажа, 6 – багаж.

Общий вид стационарного фотоядерного детектора, который может быть использован в частности для досмотра багажа авиапассажиров, показан на рис.2. Детектор состоит из импульсного электронного ускорителя (1), тракта транспортировки выведенного из ускорителя электронного пучка (2), блока развертки (2) и тормозной мишени, детектора вторичного излучения (4) и

устройства обеспечивающего транспортировку багажа (5). При расчете эксплуатационных характеристик детектора предполагалось, что электронный ускоритель обеспечивает энергию электронов в 55 МэВ, при токе пучка 30 мА в импульсе длительностью 6 мкс, а детектор вторичного излучения имеет чувствительную поверхность площадью 1 кв.м. Результаты проведенного моделирования работы детектора представлены в Табл. 2.

Таблица 2. Основные характеристики стационарного фотоядерного детектора СВВ.

Тип обнаруживаемых объектов с ВВ	любой
Минимальное обнаруживаемое количество ВВ при вероятности обнаружения 99.6%	10 г.
Время обработки единицы багажа размером 100x80 см	менее 2 с
Техническая производительность установки	до 2000 ед.багажа/ч

Как видно из представленных данных фотоядерный детектор позволяет обнаруживать с почти 100% вероятностью минимально значимые количества ВВ, а быстродействие детектора позволяет обеспечить в ряде случаев одной установкой потребности целого аэропорта.

Общий вид мобильного фотоядерного детектора для гуманитарного разминирования показан на рис. 3. Детектор может быть установлен на многоцелевом гусеничном шасси. На этом шасси должна размещаться встроенная станция электропитания, мощная система охлаждения и специальный контейнер, в котором размещаются электронный ускоритель и все основные системы, обеспечивающие его работу.

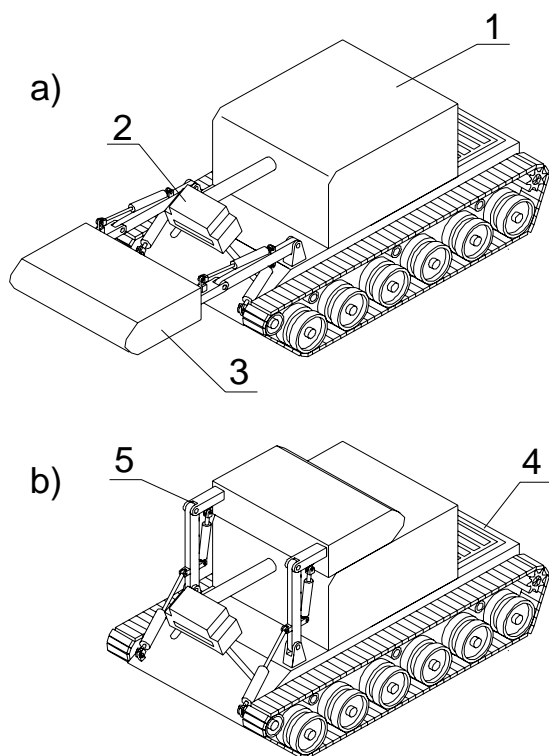


Рис. 3. Мобильный детектор ВВ для гуманитарного разминирования.

- а) рабочее положение
- б) походное положение
- 1 – пыле влаго защищенный контейнер,
- 2 – радиационная головка,
- 3 – гамма детектор,
- 4 – шасси

Электронный пучок из контейнера 1 по тракту транспортировки направляется в систему сканирования, находящуюся на конце электропровода (2) и пучок гамма-излучения последовательно облучает участки местности. Вторичное излучение регистрируется детектором

вторичного излучения (3), который находится над поверхностью грунта. Детектор установленный на подвижном шасси должен управляться дистанционно.

В табл. 3 приведены расчетные характеристики детектора, полученные с помощью компьютерного моделирования.

Таблица 3. Основные характеристики мобильного детектора СВВ.

Масса контейнера с оборудованием	менее 10 т
Ширина досматриваемой полосы перед ДВВ	3,3 м
Глубина обнаружения 40 г ТНТ в грунте	до 25 см
Глубина обнаружения 40 г ТНТ в воде	до 40 см
Производительность	до 1500 м <sup>2</sup> /ч

Заметим, что, как следует из данных табл.3, мобильный фотоядерный детектор СВВ имеет характеристики, которые полностью удовлетворяют требованиям стандарта ООН к акциям по гуманитарному разминированию. Здесь следует особо подчеркнуть, что ни один из существующих на сегодня «механизированных» методов очистки территории этим требованиям не удовлетворяет. Поэтому все работы по гуманитарному разминированию ведутся ручным способом, когда сначала размечается территория, с нее вручную удаляется растительность, а затем сапер с помощью щупа сантиметр за сантиметром «прошупывает» грунт в поисках мины. В результате работа сапера сопряжена с большим риском и отличается крайне низкой производительностью. Как правило, в среднем удается очистить таким способом за час около 50 м<sup>2</sup> [6]. Отсюда следует, что применение для разминирования мобильного комплекса позволяет приблизительно в 300 раз повысить производительность и, что принципиально, существенно понизить риск подрыва при проведении работ, поскольку работа мобильного комплекса может быть полностью автоматизирована. Кроме того, на повышения темпа проведения работ по расчистке территории благотворно влияет и то обстоятельство, что размещение детектора на гусеничном шасси позволяет вести работы на пересеченной местности покрытой кустарниковой растительностью независимо от состояния грунта и погодных условий, поскольку детектирование может успешно проводиться и при сокрытии ВВ слоем воды.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Расчетные характеристики фотоядерного детектора СВВ и результаты экспериментов показывают, что фотоядерный детектор обладает уникальными параметрами: достоверностью обнаружения, чувствительностью, быстродействием, низкой вероятностью ложных срабатываний. Массогабаритные характеристики фотоядерного детектора позволяют создавать не только стационарные установки, например, для досмотра багажа авиапассажира, но и мобильные системы, которые могут применяться при проведении акций по гуманитарному разминированию. Причем в последнем случае возможности поиска взрывоопасных предметов полностью удовлетворяют требованиям стандарта ООН к качеству проведения работ по очистке территории, а производительность мобильного детектора может в сотни раз превосходить производительность сапера выполняющего поиск ручным методом. Также немаловажным фактором является то обстоятельство, что процесс обнаружения ВВ может быть полностью автоматизирован, что исключает ошибки оператора при досмотре багажа и снижает риск при поиске мин.

Литература

1. Сердцев Н.И., Аверченко А.М., Пахомов В.П. и др. Гуманитарное разминирование: состояние, задачи и пути их решения. // Стратегическая стабильность, 2000, №2, с.33.
2. Мухин В. Взрывоопасные поля Рамзана Кадырова. // Независимое военное обозрение, 23 июня 2010 г.
3. International Standards for Humanitarian Mine Clearance Operations. UN-1996. 75 p.
4. Джилавян Л.З., Карев А.И., Раевский В.Г. Обнаружение и идентификация скрытых взрывчатых веществ в системах фотоядерного детектирования. // Известия РАН. Серия физическая, т.74, №4, с. 635.
5. Раевский В.Г., Карев А.И., Коняев Ю.А. и др. Способ и устройство для обнаружения скрытых взрывчатых веществ и наркотических средств. // Патент РФ №2226686.
6. Марков В.А., Марков И.В., Прибылов Б.В. Методика очистки местности от взрывоопасных предметов. // «Технические средства противодействия террористическим и криминальным взрывам». Труды Второй Международной научно-практической конференции (октябрь 2006 г., Санкт-Петербург), с.51.