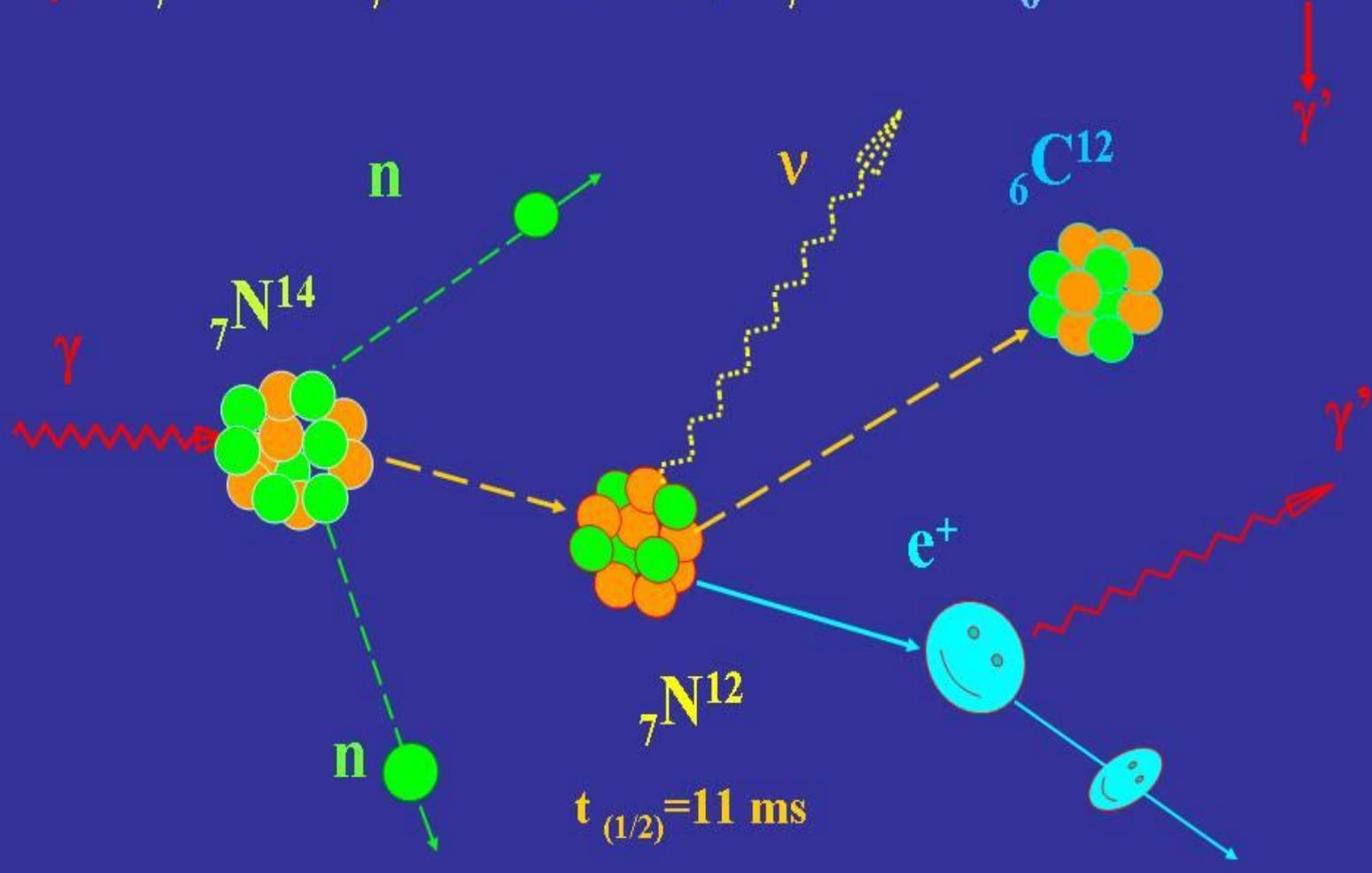


**ФОТОЯДЕРНОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ
И ДРУГИЕ МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ
СКРЫТЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ**



Отделение ядерной физики и астрофизики ФИАН

VALLEY FORGE COMPOSITE TECHNOLOGIES

Science in the National Interest



Lawrence Livermore National Laboratory

Department of Energy
University of California

Lawrence Livermore National Laboratory ensures national security and
applies science and technology to important problems of our time.

Russia – USA Photonuclear EDS collaboration
Initiatives for Proliferation Prevention Program - IPP
Программа Правительства США по предотвращению
распространения вооружений массового поражения



ОТДЕЛЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И АСТРОФИЗИКИ ФИАН

Отдел прикладной ядерной физики

Отдел физики высоких энергий

ФОТОЯДЕРНОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ И ДРУГИЕ МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ СКРЫТЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

А.И.Карев, В.Г.Раевский (raevsky@venus.lpi.troitsk.ru)

Октябрь 2010 г.

Основные задачи обнаружения скрытых взрывчатых веществ (СВВ).

Если не рассматривать задачи, стоящие перед Вооруженными силами в ходе проведения военных действий, то проблема обнаружения СВВ в современном мире имеет два аспекта.

Во-первых, ее решение связано с проблемами пресечения криминального оборота ВВ и противодействием террористической деятельности. С этой целью, в частности, организуются мероприятия по досмотру различных грузов, почтовых отправлений и багажа авиапассажира. Причем последнее направление в настоящее время развивается наиболее активно, и хорошо известно, что процедуры досмотра в аэропортах год от года ужесточаются.

Во-вторых, проблема поиска СВВ напрямую связана с проблемой гуманитарного разминирования. Минное оружие является высокоэффективным и в то же время дешевым средством вооруженной борьбы, не требующим для своего применения какой-либо заметной квалификации. По этой причине оно активно применялось в ходе различных партизанских войн, в подавляющем большинстве случаев без составления какой-либо сопроводительной документации. В результате, по оценкам ООН, сейчас в приблизительно 80 странах по всему миру установлено не менее 100 – 120 миллионов противопехотных мин, причем конкретные координаты минных полей и их характеристики неизвестны. В результате ежемесячно жертвами этих мин становятся 500 – 800 человек, и, кроме того, риск подрыва приводит к тому, что огромные территории выводятся из хозяйственного оборота, что крайне негативно сказывается на экономике этих, как правило, бедных стран.

Эта проблема относится и к территориям России, и стран СНГ, где остались мины и боеприпасы со времен Великой Отечественной войны. По мнению экспертов МО, включая начальника инженерных войск России генерал-полковника Н.И.Сердцева, на сегодняшний день на территории только 9 субъектов Российской Федерации требуют разминирования более 5400 км² 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.

Гуманитарное разминирование, т.е. очистка территорий, где не ведутся военные действия, проводится силами коммерческих организаций, и рынок их услуг оценивается в 90 миллиардов долларов США. При этом в отличие от ситуации с обеспечением безопасности авиапассажира, где нет единых международных стандартов (пожалуй, только кроме общепризнанного значения минимальной значимой массы ВВ в 50 г.), гуманитарное разминирование должно проводиться в соответствии со стандартами ООН, которые предписывают очистку от всех зарядов на глубину до 20 см с вероятностью 99.6% [2].

Современные методы обнаружения СВВ.

Современные методы обнаружения СВВ можно разделить на две основные группы: прямые методы, позволяющие обнаруживать собственно ВВ или составляющие их компоненты, и

косвенные - с помощью которых обнаруживаются признаки, присущие изделию, содержащему ВВ, например, материал корпуса или взрывателя, форма объекта, его температурный контраст с окружающей средой и многие другие. В настоящее время предложено большое число самых разнообразных методов поиска СВВ, вплоть до самых экзотических, например, использование для этой цели генномодифицированных насекомых, которые, почувствовав запах ВВ, облепляют роем предмет его содержащий. Поэтому далее мы ограничимся обсуждением только тех методик, которые как минимум прошли экспериментальную проверку, выйдя на стадию ОКР.

Наибольшее распространение при работе на местности получили косвенные методы обнаружения СВВ, основными из которых являются индукционные, магнитометрические и так называемые радиоволновые. Первые два метода позволяют обнаруживать объекты, имеющие в своих конструкциях металлические детали, а последние - объекты, материал которых отличается от окружающей среды своей диэлектрической проницаемостью. На этих принципах работают различные металлоискатели и обнаружители диэлектрических неоднородностей. При этом надо отметить, что получившие широкое распространение металлоискатели в реальных условиях часто оказываются неэффективными ввиду чрезвычайно высокой вероятности ложных срабатываний, которая может составлять 0.999 и более. Это связано с тем, что для того, чтобы обнаружить современную противопехотную мину, в конструкции которой масса металлических деталей составляет всего несколько грамм, чувствительность металлоискателя надо сделать достаточно высокой, но при этом он начинает реагировать на многочисленные металлические включения, во множестве присутствующие в грунте на урбанизированной местности или в местах, где ранее проходили боевые действия.

Поиск взрывоопасных предметов по косвенным признакам проводится также с помощью различных интроскопов, когда с помощью просвечивания рентгеновскими лучами строится изображение внутренности досматриваемого объекта. При использовании маломощных рентгеновских трубок ведут, например, досмотр багажа в аэропортах. В наиболее совершенных интроскопах построение изображения осуществляется при двух различных энергиях просвечивающих объект лучей, что дает возможность различить материалы по эффективному атомному номеру $Z_{эфф}$, что несколько увеличивает информативность «картинки». Используя мощные гамма-излучатели, построенные на пучках электронных ускорителей, можно увидеть содержимое 20-футовых контейнеров. Такие установки есть в США, Франции, Германии, Англии. Они очень дороги (~ 20 млн. долларов) и по этой причине их немного, и в портах только не более 5% грузов подвергаются такому контролю. В России комплексы для досмотра крупногабаритных объектов были разработаны в МРТИ и НИИЭФА. Это «ПОЛЕ», «КАМА», ЭФАСКАН. В эксплуатацию они введены не были. Получившие широкое распространение интроскопы для досмотра багажа позволяют обнаруживать взрывоопасные предметы только по косвенным признакам, таким как особая форма объекта или наличие различных проводов, что весьма ненадежно. По этой причине, например, в аэропорту Вашингтона (США) при досмотре ручной клади, если в ней рентгеновским интроскопом обнаруживают ноутбук или видеокамеру, сотрудник службы безопасности просит пассажира ее достать и включить, чтобы убедиться, что это не муляж, содержащий бомбу.

Существуют и другие косвенные методы обнаружения СВВ. Например, мину, прикрытую грунтом, можно обнаружить по ее тепловому контрасту с окружающей поверхностью, который проявляется на закате и восходе Солнца.

При поиске мин в грунте иногда используется георадар, более 20 лет применяемый в гражданской инженерии, геологии и археологии. Эта установка излучает в грунт радиоволны на частотах от сотен МГц до нескольких ГГц и улавливает антенной отраженный сигнал. Основным недостатком этих систем, препятствующий их применению, связан с крайне затруднительной идентификацией получаемого ответного сигнала, который зависит от формы объекта, его размера, положения объекта в грунте и от свойств самого грунта.

В принципе большей надежностью обнаружения СВВ и меньшей вероятностью ложных сигналов могут обладать системы, основанные на прямых методах обнаружения СВВ. Это прежде всего относится к различным устройствам, использующим химические методы обнаружения. Чувствительность таких современных систем столь высока, что с их помощью можно обнаружить незначительные следы, т.е. исчезающе малые количества ВВ, которые оказываются вне «упаковки» за счет испарения материала ВВ или рассеивания его микрочастиц. Как правило, в этих устройствах поиска применяются различные газоанализаторы, реагирующие на химические молекулы ВВ. Так, в одной из систем, которая проходила испытания в аэропортах, пассажир заходил в специальную кабину, объем которой продувался теплым воздухом. Затем этот воздух направлялся в газоанализатор, где определялся химический состав присутствующих в нем примесей. На многих таможенных постах используется методика поиска ВВ, когда подозрительные места автомобиля, например, бензобак, протирается специальной ватой, которая затем помещается для анализа в устройство, содержащее газоанализатор.

Суммируя данные по химическим методам обнаружения СВВ, можно сказать, что современные методы молекулярного анализа позволяют обнаруживать сколь угодно малые следовые количества ВВ, однако чем выше требуемая чувствительность метода, тем большее время требуется для проведения анализа. Это обстоятельство, а также маскирование в ряде случаев искомого ВВ другими веществами, например, косметическими, ограничивает практическое применение химических методов поиска.

Одним из широко используемых методов поиска СВВ, являющегося по существу химическим, является использование для этой цели специально подготовленных собак. Эти животные могут обнаружить ничтожные количества ВВ, попавшего при неаккуратном с ним обращении на упаковку, одежду или тело злоумышленника. Собаки также могут успешно искать и мины, установленные в грунте. Однако, будучи живыми существами, они как работники могут уставать, болеть, или, в конце концов, быть в плохом настроении. Кроме того, собаки требуют постоянного квалифицированного ухода, и стоимость высококлассного поисковика доходит до 10 тысяч долларов США. Эти обстоятельства не позволяют считать специально подготовленных собак идеальным средством поиска СВВ.

Другой класс устройств прямого обнаружения СВВ основан на применении физических методов, связанных с эффектами взаимодействия ядер атомов в молекулах вещества с электромагнитной волной. Это метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР) и метод ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР). Не вдаваясь в детальное рассмотрение физических основ, определяющих суть этих методов, а основываясь на уровне их проработки и результатах практического применения созданных на их основе технических средств, можно сказать следующее. Метод ЯМР реально может быть использован только в стационарных условиях и позволяет обеспечить контроль относительно небольших объемов среды (до нескольких литров), помещенных внутрь зоны, в которой создается мощное магнитное поле. Метод ЯКР позволяет создавать более компактные устройства, но область спектра, в которой находятся резонансные частоты таких широко используемых ВВ, как тротил и гексоген, лежат в диапазоне наиболее интенсивных промышленных радиопомех, в связи с чем обнаружение и обработка полезных сигналов связана с большими техническими сложностями.

В последние десятилетия интенсивно разрабатываются прямые ядерно-физические методы обнаружения СВВ, основанные на регистрации ядерных реакций, возбуждаемых в веществе обследуемого объекта. Они включают в себя нейтронно- и гамма-активационные методы.

Нейтронные методы поиска СВВ имеют давнюю историю, насчитывающую не одно десятилетие. Суть этих методов состоит в том, что с его помощью стараются обнаружить в досматриваемом объекте избыточную концентрацию атомов азота, что является классифицирующим признаком наличия СВВ, поскольку азот входит в состав всех боевых ВВ. Сегодня известно достаточно много вариантов нейтронной методики, но наиболее изученным

является метод тепловых нейтронов (ТНА). В этом методе тепловые нейтроны взаимодействуют с ядрами азота, в результате чего излучаются гамма-кванты с энергией 10.8 МэВ, регистрация которых является признаком присутствия азота. Привлекательность метода, обусловливавшая длительность попыток его использования, связана с тем, что нейтроны очень интенсивно взаимодействуют с азотом и, казалось, что для реализации метода достаточно использовать сравнительно недорогой и безопасный нейтронный источник. По этой причине на основе этой методики были разработаны как стационарные, так и мобильные устройства, которые проходили стадию натурных испытаний, в ходе которых обнаружили их существенные недостатки. Оказалось, что из-за того, что нейтроны активно взаимодействуют не только с азотом, но и практически со всеми элементами таблицы Менделеева, полезный сигнал, который несут гамма-кванты с энергией 10.8 МэВ, сильно зашумлен гамма-квантами других энергий, возникающими от паразитных реакций нейтронов с ядрами других химических элементов. И для того, чтобы выделить полезный сигнал, надо набрать большую статистику, что требует значительного времени. Так, все созданные на сегодняшний день нейтронные системы обнаружения СВВ, испытанные в аэропортах разных стран, могли обнаруживать достаточно большие массы тринитротолуола (~200 г.) за время не менее 10 минут. Подобные показатели совершенно не удовлетворяли службы безопасности, поскольку для досмотра 300 единиц багажа (средняя загрузка авиалайнера) такой системе требовалось 50 часов. Любые попытки перенастроить систему для увеличения производительности приводили к тому, что она либо вообще переставала реагировать на ВВ, либо начинала выдавать недопустимое количество ложных сигналов. В результате испытания всех изготовленных устройств они были признаны неудовлетворительными. Такая же судьба постигла, например, и Канадскую подвижную систему для поиска мин. Оказалась, что она способна обнаружить 300 г. ВВ на глубине не более 10 см и ей нужно для этого не менее 10 мин, что далеко от требований стандарта ООН. Кроме того, в ходе испытаний выяснилось, что система оказывается практически неработоспособной, если грунт влажный или покрыт снегом, что связано с тем, что водород, входящий в состав воды, чрезвычайно сильно поглощает просвечивающие грунт нейтроны. К сожалению такие, же неудовлетворительные результаты были получены при испытаниях устройств, работающих на других, отличных от ТНА, модификациях нейтронно-физического метода.

Ядерно-физический метод обнаружения СВВ, основанный на гамма-активационном анализе, был предложен лауреатом Нобелевской премии Луисом Альваресом [3]. Метод, получивший впоследствии название «фотоядерный метод обнаружения», основан на облучении объекта пучком высокоэнергетичных гамма-квантов, вызывающих в веществе различные фотоядерные реакции, приводящие к возникновению радионуклидов, распад которых сопровождается появлением вторичного излучения. В силу того, что при облучении азота и/или углерода вторичное излучение имеет уникальные характеристики и, учитывая, что как зондирующее, так и вторичное излучение, несущее полезный сигнал, представляют собой поток гамма-квантов, оказывается возможным, используя этот метод обнаружения, построить эффективный детектор ВВ, обладающий высокой чувствительностью, быстродействием и проникающей способностью. Кроме того, сотрудниками ФИАН была разработана методика определения относительных концентраций азота и углерода в досматриваемом объекте, что позволяет не только с высокой вероятностью подавлять ложные сигналы от азот- или углеродсодержащих веществ, но даже идентифицировать конкретный тип обнаруженного ВВ [4]. Следует подчеркнуть, что поскольку фотоядерный детектор реагирует на присутствие углерода, который входит в состав всех природных наркотических средств (НС), он может быть использован не только для поиска ВВ, но и НС.

В силу того, что в настоящее время достигнут безусловный прогресс в разработке детектора СВВ на основе фотоядерного метода детектирования, ниже подробно обсуждаются вопросы, связанные с его созданием, и результаты экспериментов по обнаружению и идентификации ВВ.

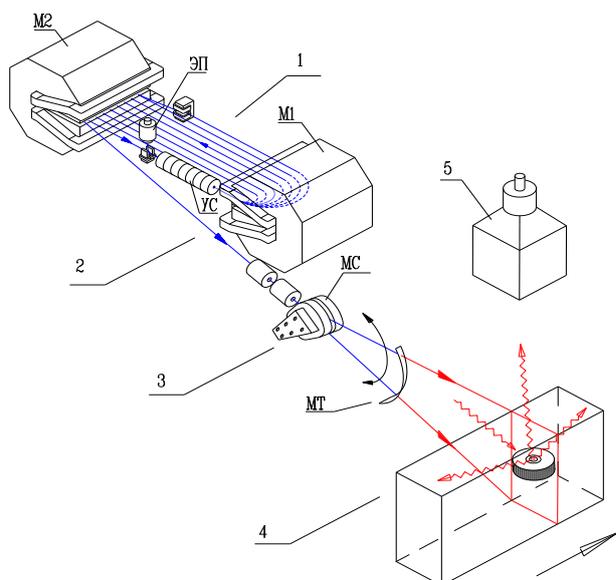


Рис.1. Схема фотоядерного детектора СВВ.

Проведенное в ФИАНе компьютерное моделирование работы фотоядерного детектора ВВ, выполненное с учетом особенностей прохождения первичного зондирующего гамма-излучения через скрывающее вещество, взаимодействия гамма-квантов с ВВ и выхода вторичного излучения, позволило определить эксплуатационные характеристики установки как для стационарного варианта ее использования (табл.1), так и для мобильной системы, предназначенной для поиска мин при гуманитарном разминировании [9].

Таблица 1. Основные характеристики стационарного детектора СВВ.

Тип обнаруживаемых объектов с ВВ	любой
Минимальное обнаруживаемое количество ВВ при вероятности обнаружения 99.6%	10 г.
Тип обнаруживаемых объектов с НС	упаковки с НС, содержащими углерод
Минимальное обнаруживаемое количество НС при вероятности обнаружения 99.6%	50 г
Время обработки единицы багажа размером 100x80 см	менее 2 с
Техническая производительность установки	до 2000 ед.багажа/ч
Возможность полной автоматизации процедуры досмотра	есть

Кроме того, было проведено эскизное проектирование компоновки узлов фотоядерного детектора ВВ на универсальном гусеничном шасси ГМ459 (рис.2), которое показало реализуемость проекта как по масса-габаритным характеристикам, так и по энергопотреблению оборудования. Основные ТТХ такого детектора приведены в табл.2.

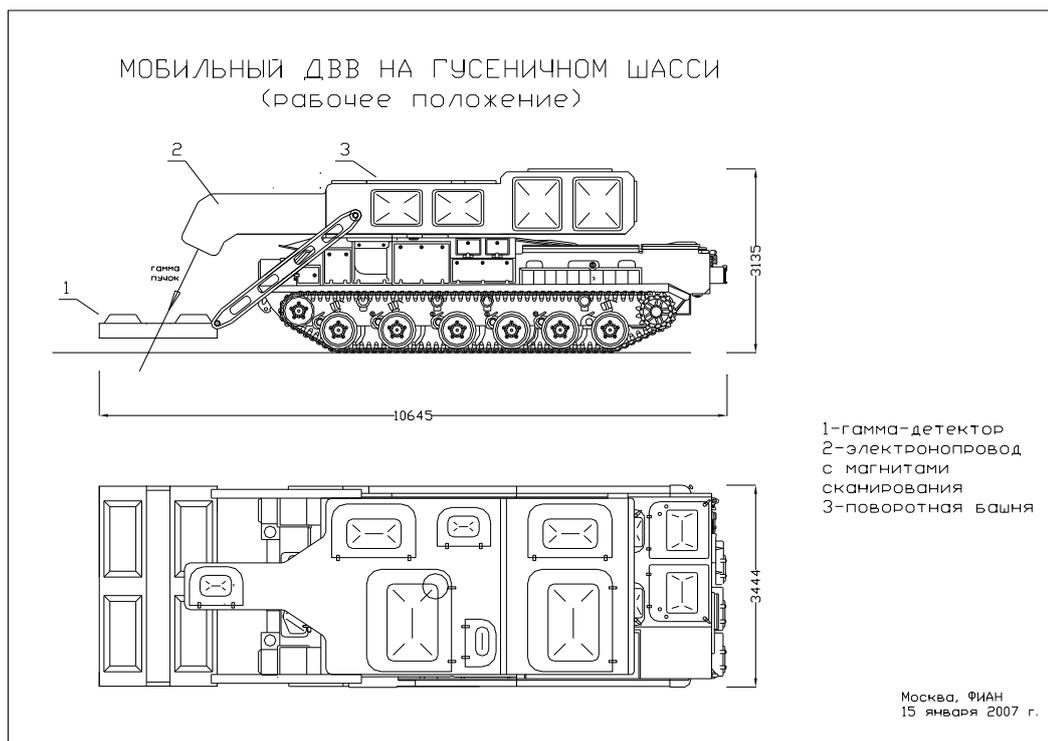


Рис.2. Мобильный фотоядерный детектор на универсальном гусеничном шасси ГМ569.

Таблица 2. Основные характеристики мобильного детектора СВВ.

Габаритные размеры (Д x Ш x В)	
Рабочее положение	10645x3444x3135 мм
Транспортное положение	9318x3444x3135 мм
Масса подвижной башни с оборудованием	менее 10 т
Ширина досматриваемой полосы перед ДВВ	3270 мм
Ширина досматриваемой полосы обочины	2755 мм
Глубина обнаружения 40 г ТНТ в грунте	до 25 см
Глубина обнаружения 40 г ТНТ в воде	до 40 см
Производительность	до 1500 м ² /ч

Заметим, что, как следует из данных табл. 2, 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 «прощупывает» 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 5 м² [10]. 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.

Прототип фотоядерного детектора ВВ и первые экспериментальные результаты

Публикация ФИАНом работ по развитию фотоядерного метода детектирования ВВ привлекла внимание иностранных инвесторов, в частности американскую компанию Valley Forge Composite Technologies Inc. (VFCT, Covington, KY). В результате между ФИАНом, VFCT и Ливерморской национальной лабораторией им. Лоуренса (LLNL, США) в рамках программы IPR Правительства США был заключен контракт, позволивший начать разработку и сооружение прототипа детектора СВВ.

В качестве электронного ускорителя в проекте был использован специально разработанный для этой цели разрезной микротрон РАМ-55 на энергию 55 МэВ [11], основные параметры которого приведены в табл. 3.

Таблица 3. Основные характеристики разрезного микротрона РАМ-55.

Энергия ускоренных электронов	55 МэВ
Импульсный ток электронного пучка	до 50 мА
Длительность импульса тока	до 16 мкс
Частота повторения импульсов	до 50 Гц
Габаритные размеры (Д x Ш x В)	2595x500x1660 мм ³

Выбор именно этого типа электронного ускорителя был обусловлен тем, что такие ускорители отличаются прежде всего малыми габаритами по сравнению с, например, линейными машинами, что имеет первостепенное значение как для стационарных, так особенно для мобильных установок.

Для регистрации вторичного излучения был разработан черенковский водяной счетчик, в котором рабочим телом является дистиллированная вода, объем которой просматривается четырьмя фотоумножителями. При этом эффективная площадь регистрации детектора равна 0.5 м². Следует подчеркнуть, что использование черенковских детекторов для регистрации вторичного излучения в фотоядерном детекторе ВВ имеет целый ряд преимуществ, которые, в конечном счете, упрощают процесс выделения сигналов о наличии ВВ и удешевляют установку.

Как система регистрации вторичного излучения, так и система управления разрезным микротроном глубоко компьютеризированы, что позволяет в будущем осуществить ее переход в полностью автоматический режим работы.

Несмотря на крайнюю неритмичность финансирования и весьма ограниченный бюджет проекта, прототип фотоядерного детектора ВВ был спроектирован и изготовлен. При этом особо следует подчеркнуть, что все узлы детектора ВВ были разработаны, сконструированы и изготовлены на отечественных предприятиях.

Общий вид микротрона в процессе его монтажа показан на рис.3, черенковский водяной счетчик – на рис.4, а общий вид собранного прототипа детектора СВВ – на рис.5.



Рис. 3. Общий вид разрезного микротрона РАМ-55.



Рис.4. Черенковский водяной счетчик.



Рис. 5. Прототип фотоядерного детектора СВВ.

После наладки оборудования на созданном прототипе детектора СВВ были проведены первые эксперименты, связанные с задачей обнаружения. При этом исследуемый объект облучался однократным импульсом гамма-излучения длительностью 5 мкс и после чего в течение 20 мс с шагом в 1 мс записывалось временное распределение событий, регистрируемых черенковским водяным счетчиком. Облучению подвергались образцы, содержащие только азот (мочевина), только углерод (графит), азот и углерод (имитатор ВВ) и не содержащие ни азот, ни углерод (алюминий). Все образцы при облучении были скрыты слоем строительных кирпичей.

В результате последующего анализа полученных спектров выяснилось, что наличие в образце азота и/или углерода приводит к возникновению сигналов, которые хорошо отделяются от фоновых, не связанных с возникновением искомым фотоядерных реакций, и набранного в результате однократного облучения статистического материала достаточно для построения «**k-портрета**» обследуемого объекта.

k-портрет – это некая величина, которая однозначно связана с отношением концентраций азота и углерода в облученном веществе. Она была введена в работе [2] для идентификации ВВ, где также описан алгоритм ее вычисления по анализу спектра и показано, что с помощью k-портретов можно не только отличить азот- и/или углерод- содержащие вещества от ВВ, но даже идентифицировать конкретный тип ВВ (например, тротил или гексоген). Дальнейшее развитие методики k-портрета, проведенное в ФИАНе показало, что с его помощью можно дополнительно понизить вероятность появления ложных сигналов, если проводить его вычисления для нескольких интервалов измеренного временного спектра [12].

Для иллюстрации вышесказанного на рис. 6 приводится экспериментально измеренный очищенный от фона временной спектр сигналов от мочевины. Видно, что форма полученного спектра соответствует форме распадной кривой для короткоживущих изотопов, а набранный за 20 мс статистический материал включает приблизительно 1000 событий. Аналогичные спектры как по форме, так и по величине набранной статистики были получены при облучении других образцов, содержащих азот и/или углерод.

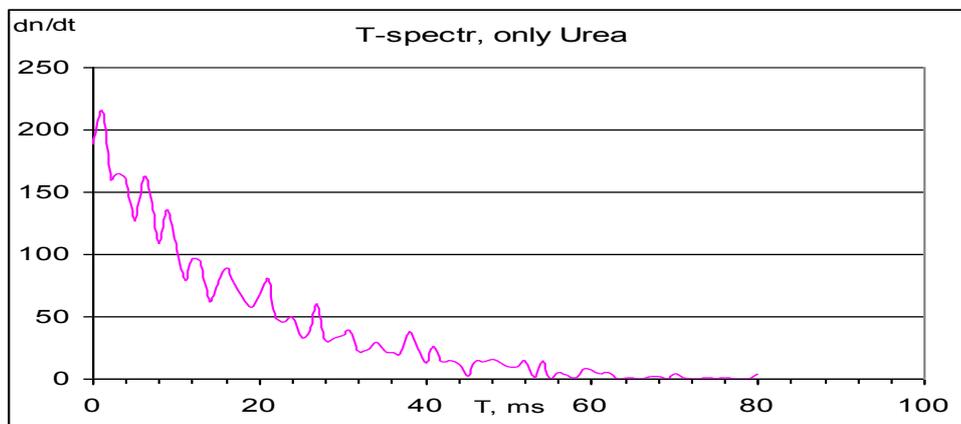


Рис. 6. Временной спектр сигналов, полученных при облучении мочевины.

На рис. 7. в качестве примера показаны результаты обработки временного спектра, полученного при облучении имитатора ВВ. Видно, что построенные для различных временных интервалов значения k -портретов мало отличаются по величине, и аппроксимирующая зависимость величины k от времени прямая имеет малый наклон по отношению к горизонтальной оси. Последнее обстоятельство имеет значение определяющего классификационного признака обнаружения вещества, содержащего азот и/или углерод, поскольку в случае обработки спектров от объектов, не содержащих азота или углерода, значения k , вычисленные для различных временных интервалов, заметно отличаются, и аппроксимирующая k -зависимость прямая сильно наклонена.

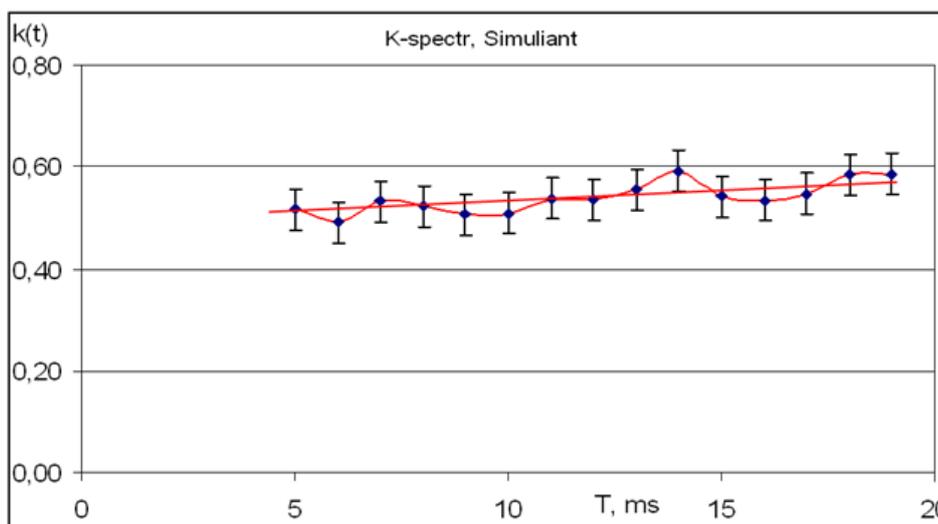


Рис.7. Зависимость величины k от времени, построенная из спектра для имитатора ВВ.

Суммарные результаты, полученные при облучении различных веществ приведены в табл.4. Видно, что фотоядерный детектор по величине k позволяет надежно идентифицировать вещества, содержащие азот и/или углерод. Кроме того, в случае, если в облученных объектах нет азота или углерода, то они уверенно отделяются по величине наклона прямой, аппроксимирующей временную k -зависимость (параметр q).

Таблица 4. Результаты экспериментов с различными веществами

Вещество	Значение k	Статистическая ошибка значения k	q[1/мс]
Мочевина	0,981	0,081	0,003
Углерод	0,104	0,08	0,001
Имитатор ВВ	0,547	0,004	0,005
Алюминий	0,781	0,08	0,11

Сравнительные характеристики стационарных систем досмотра багажа

В табл.5 приведены сравнительные характеристики стационарных систем для досмотра багажа авиапассажиров: фотоядерный детектор СВВ (ФИАН), нейтронно-активационный детектор СВВ (ОИЯИ) и интроскопы производства американской компании InVision, которые на сегодняшний день являются, по-видимому, наиболее совершенными установками такого типа.

Таблица 5. Сравнение характеристик различных детекторов СВВ

	Фотоядерный детектор СВВ (ФИАН)	Нейтронный детектор ДВиН-1,2 (ОИЯИ)	Интроскопы СТХ5500 и СТХ 9000 (InVision)
Метод обнаружения	прямой, фотоядерный при сканировании объекта	прямой, нейтронно-активационный общее облучение объекта	Просвечивание рентгеновскими лучами
Тип обнаруживаемых объектов с ВВ	любой	любой	нет данных
Тип обнаруживаемых объектов с наркотическими веществами	упаковки НС, содержащих углерод и/или азот	Нет данных	нет данных
Минимальное обнаруживаемое количество ВВ при вероятности обнаружения 99,6 %	10 г	100 г	нет данных
Минимальное обнаруживаемое количество НС при вероятности обнаружения 99,6 %	50 г	нет данных	нет данных
Время обработки единицы багажа размером 140x100x60 см ³	менее 2 секунд	3 мин	нет данных
Возможность полной автоматизации процедуры поиска	имеется	имеется	отсутствует

Несмотря на то, что в вышеприведенной таблице многие позиции оказались не заполненными в силу отсутствия в литературе соответствующей информации, из анализа приведенных данных можно сделать определенные выводы.

Сегодня есть две авторитетных организации, отвечающие за безопасность авиаперелетов. Это американская FAA (Federal Aviation Administration) и Европейская ЕСАС (European Civil Aviation Commission), в которую входят 44 страны. Этими организациям были сформулированы требования к организации досмотра багажа авиапассажира, которые, в частности, предписывают 100% -ный досмотр, среднее время на досмотр единицы багажа не должно превышать 7 сек, а минимальная значимая масса ВВ определена в 50 г ТНТ. Если сравнить эти требования с характеристиками систем, приведенных в табл. 5, то становится очевидным, что только фотоядерный детектор им удовлетворяет.

Действительно, несмотря на то, что интроскопы InVision являются весьма совершенными устройствами, а модель СТХ 9000 способна строить даже 3D-изображения, процедура обнаружения полностью возлагается на оператора, решение которого носит сугубо субъективный характер и зависит от его опыта и психофизиологического состояния. Именно по этой причине в характеристиках своих устройств фирма не приводит никаких данных о минимально обнаруживаемой массе ВВ. Нет также данных и о быстродействии системы. Из просмотра рекламных роликов можно сделать вывод, что процедура просвечивания занимает время порядка нескольких секунд, однако за это время оператор не в состоянии внимательно рассмотреть появившуюся на дисплее картинку, и поэтому вся процедура досмотра единицы багажа явно не укладывается в требуемые 7 с. Судя по всему, именно по этой причине InVision настоятельно рекомендует максимально распараллеливать в аэропорту процедуру досмотра.

По сравнению с интроскопами InVision, нейтронный детектор ДВиН-1,2 (ОИЯИ), использующий прямой метод поиска СВВ, позволяет в принципе обнаружить СВВ в полностью автоматическом режиме работы. Однако характеристики этого детектора также не удовлетворяют требованиям служб безопасности. Это касается как времени проведения инспекции (3 мин), так и заявленной обнаруживаемой массы в 100 г ТНТ. Можно предположить, что разработчики ДВиН-1,2 смогут в будущем повысить его чувствительность, однако это, почти наверняка, будет сопровождаться увеличением требуемого времени экспозиции, которое и сейчас совершенно неприемлемо велико. Действительно, если предположить, что на борт авиалайнера надо загрузить 300 единиц багажа, то тогда для его досмотра с помощью этого детектора понадобится 15 часов «чистого» времени. Если попытаться сократить продолжительность досмотра до одного часа, то тогда надо обеспечить параллельную работу, по крайней мере, 15 таких установок. А если учесть, что в течение часа в крупном аэропорту осуществляется (например, в Шереметьево) до 20 вылетов, то становится ясно, что для обслуживания пассажиропотока понадобится установить несколько сотен таких детекторов.

Таким образом становится очевидным, что только фотоядерный детектор ФИАН полностью удовлетворяет всем требованиям служб, отвечающих за безопасность перелетов. При этом следует отметить, что, обладая уникальным быстродействием и чувствительностью, этот детектор позволяет полностью автоматизировать процесс досмотра, что исключает влияние «человеческого» фактора и соответственно повышает надежность обнаружения СВВ. Следует также отметить, что с помощью фотоядерного детектора можно отслеживать наличие в багаже природных наркотических средств, что является, безусловно, дополнительным аргументом в пользу его применения.

В табл.5 отсутствуют сведения в вероятности ложных срабатываний досмотровой аппаратуры, которые возникают в процессе поиска СВВ, из-за того, что эти характеристики не приводятся ни для интроскопов InVision, ни для детектора ДВиН-1,2. Что касается фотоядерного детектора, то из результатов проведенного компьютерного моделирования (подтвержденных результатами первых экспериментов) следует, что он надежно отделяет сигналы ВВ от

сигналов как НС, так и других азот- или углерод- содержащих веществ (древесина, нейлон, капрон, мыло, азотные удобрения и т.п.). Это обстоятельство, подтвержденное в ходе первых экспериментов, дает основания надеяться, что при эксплуатации фотоядерного детектора число его ложных срабатываний будет минимальным.

Проблемы радиационной безопасности при эксплуатации фотоядерного детектора

Наличие в составе фотоядерного детектора СВВ мощного источника высокоэнергетического тормозного излучения предопределяет необходимость решения проблемы радиационной безопасности при его эксплуатации. При этом можно выделить два аспекта этой проблемы – защита персонала и защита населения от радиационных последствий работы установки.

Для стационарного детектора задача обеспечения радиационной безопасности для персонала является обычной, и методы ее решения известны. Защита от ионизирующего излучения при работающей установке такая же, как и на сотнях электронных ускорителях, эксплуатируемых во всем мире (бетонные стены радиационной защиты, контролируемый доступ, индивидуальный и групповой дозиметрический контроль). В результате работы детектора некоторые его элементы активируются, что, в принципе, может представлять опасность. Это требует от персонала соблюдения определенных правил радиационной гигиены, которые хорошо разработаны, проверены многолетней практикой и не являются чрезмерно обременительными.

При использовании фотоядерного детектора на таможах и в аэропортах определенную опасность для населения могут представлять радионуклиды, которые образуются в ходе облучения досматриваемого объекта. Чтобы оценить эту опасность были проведены расчеты уровня наведенной активности в досмотренном багаже в зависимости от его содержимого. Полученные результаты сводились к тому, что в результате досмотра остаточная радиоактивность багажа оказывается незначительной и либо сразу не представляет опасности, либо снижается до безопасного уровня в течение 40 – 60 минут, что, как правило, меньше времени авиаперелета. При этом полученная оценка проводилась по нормам НРБ и была сильно завышена, поскольку предполагалось, что облученное при досмотре вещество попадает в организм человека (т.е. съедается сразу после досмотра). Кроме теоретических расчетов, в ФИАНе был проведен эксперимент по облучению, имитирующему дозную нагрузку при досмотре, различных продуктов: хлеба, сахара, кофе, сосисок, рыбы, водки. В результате было установлено, что уровень наведенной в продуктах активности сразу после облучения крайне мал, а через 40 минут вообще не фиксировался.

Несколько отличная ситуация возникает при эксплуатации фотоядерного детектора на подвижной установке при проведении гуманитарного разминирования. В этом случае защита от ионизирующего излучения осуществляется веществом и расстоянием. Вещество (свинец) прикрывает наиболее сильно излучающие элементы установки (тормозную мишень и узел сканирования). Расстояние от работающего детектора, на котором мощность дозы облучения снижается до безопасного уровня, обеспечивается размерами зоны оцепления, которая обязательно создается при проведении работ по разминированию. Что касается влияния облучения на почву, то, согласно расчетам, за счет очень короткого времени облучения (несколько микросекунд) работа детектора не причиняет никакого экологического ущерба.

Оценка рынка.

Нашим промышленным партнером в США компанией Valley Forge Composite Technologies Inc. было проведено маркетинговое исследование потребностей в стационарных фотоядерных детекторах скрытых взрывчатых веществ. Результаты приведены в таблице 6.

Таблица 6. Потребность в приобретении фотоядерных стационарных установок.

Countries	Units	
USA	452	Airports at 1/airport
USA	360	Seaports at 1/seaport
UK	250	Air and Sea
Turkey	95	1 per air and sea
Middle	750	Palaces, air, sea, borders
Europe	850	Air and Sea
Total	2757	

По оценке ООН общая стоимость работ по гуманитарному разминированию нашей планеты составляет ~ 2 млрд.долларов США. Расчеты, выполненные нами с учетом производительности установки и эффективности фотоядерного метода обнаружения СВВ, показывают, что отряд из 400 фотоядерных мобильных комплексов гуманитарного разминирования очистят все земли хозяйственного назначения (дороги, берега, поля, луга, и пр.) от минной чумы в течение 3-х лет.

Заключение

Подробное рассмотрение расчетных характеристик фотоядерного детектора СВВ, их сравнение с характеристиками уже применяющихся или перспективных устройств обнаружения показало, что фотоядерный детектор СВВ обладает уникальными параметрами: быстродействием, чувствительностью, проникающей способностью и рядом других черт, что обеспечивает его высокую эффективность, недостижимую для устройств, работающих на других физических принципах.

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.33-40.
2. International standard for humanitarian mine clearing operational UN-1996. -75p.
3. Luis W.Alvarez. Nitrogen detection. Patent USA, №4756866. July 12 1988 / Oct. 9, 1985.
4. Раевский В.Г., Карев А.И., Коняев Ю.А. и др. Патент РФ № 2226686: Способ и устройство для обнаружения и идентификации скрытых взрывчатых веществ и наркотических средств. 10 апреля 2004 г. (Бюл. № 10) / 14 августа 2002 г.
5. Trower W.P. // Nuclear Instruments and Methods, B79 (1993) 589.
6. Белоусов А.С., Карев А.И., Малиновский Е.И. и др. // Наука производству, 2000. № 6. С. 33
7. Карев А.И., Раевский В.Г., Коняев Ю.А.и др. // Электроника НТБ, 2002. №1. С.54.
8. Белоусов А.С., Илющенко Р.Р., Карев А.И. Раевский В.Г. и др. Патент РФ № 2185614: Устройство для обнаружения скрытых взрывчатых веществ. 20 июля 2002 г. (Бюл. № 20) / 18 декабря 2000 г.
9. Karev A.I., Raevsky V.G., Konyaev J.A. et al. // Proceeding of NATO Advanced Research Workshop #977941 «Detection of Explosives and Land Mines: Methods and Field Experience», St.-Petersburg, 11th-14th of September 2001, Russia, NATO-Series book, Kluwer Academic Publisher, Netherlands.
10. В.А.Марков, И.В.Марков, Б.В.Прибылов. 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
11. Karev A.I., Lebedev A.N., Raevsky V.G. et al. 55MeV Race-Trace Microtron of Lebedev Institute.// Proceeding of RuPAC 2008, p.126-128.
12. Джилавян Л.З.,Карев А.И., Раевский В.Г. Обнаружение и идентификация скрытых взрывчатых веществ в системах фотоядерного детектирования. //Известия РАН, серия физическая, 2010, т.74, №4, с.635-640.