

# **Использование метода меченых нейтронов для поиска скрытых взрывчатых веществ**

В.М.Быстрицкий, А.И.Иванов, В.Г.Кадышевский, А.П.Кобзев, В.А.Никитин,  
Ю.Н.Рогов, М.Г.Сапожников, В.М.Слепнёв, А.Н.Сисакян, Н.В.Власов

Объединённый Институт Ядерных Исследований, Дубна

## **Аннотация**

Исследованы основные параметры прототипа детектора для дистанционного неразрушающего поиска взрывчатых веществ, скрытых в контейнерах или почве. В основе устройства лежит метод меченых нейтронов (ММН). Представлены результаты экспериментов на электростатическом ускорителе Ван де Граафа. Показано, что 400 г ТНТ, экранированные 42 см почвы, детектируются за 3 минуты. Образец меламина, массой 100 г, экранированный 9 см почвы, детектируется за 5 минут. Важной особенностью ММН является его чувствительность к химическому составу вещества. Мы продемонстрировали уверенную идентификацию взрывчатых веществ на фоне других объектов. Уникальным преимуществом ММН является получение трёхмерного изображения скрытого объекта. Высокое соотношение сигнал-шум, обеспечиваемое ММН, существенно облегчает идентификацию скрытых веществ.

## 1. Вступление

Метод сопутствующих частиц (ММН), называемый также методом меченных нейтронов и Associated Particle Imaging (API) в англоязычной терминологии, это методика, позволяющая получить трёхмерное изображение объекта, скрытого в контейнере или почве, и идентифицировать его. Методика не требует физического контакта с объектом и может быть использована для разминирования, антитеррористических операций, поиска скрытых веществ на таможне, так же как и для различных промышленных применений. Изучение ММН проводилось в Los Alamos National Laboratory [1], Argonne National Laboratory [2], Bechtel Nevada Special Technologies Laboratory [3], INFN (Italy) [4], ОИЯИ [5], а также в других лабораториях (для обзора см. [6,7,8]).

В 1999 году была создана первая установка на канале электростатического ускорителя Ван де Граафа ОИЯИ, Дубна. В 2000-2001 годах был создан откачной генератор быстрых нейтронов и установка на его основе. Выявленные в процессе работы недостатки конструкции генератора вынудили вновь перейти на ускоритель Ван де Граафа. В 2002 году совместно в ВНИИА, Москва, был создан отпаянный вариант НГ со встроенными  $\alpha$ -детекторами. Этот доклад описывает результаты последних проведённых в ОИЯИ экспериментов по изучению характеристик лабораторного прототипа устройства для удалённой идентификации скрытых веществ, основанного на ММН. ММН использует быстрые монохроматические нейтроны 14.1 МэВ из бинарной реакции  $d+t \rightarrow {}^4\text{He}+n$ . В этой реакции,  $\alpha$ -частица с энергией 3.5 МэВ вылетает в противоположную от нейтрона сторону (в системе центра масс). Измерением траектории альфа-частицы определяется траектория соответствующего нейтрона. Эти “меченые” нейтроны взаимодействуют с исследуемым объектом и рождают  $\gamma$ -кванты в  $A(n,\gamma)A'$  реакциях с энергетическим спектром, характерным для каждого химического элемента. Характеристические  $\gamma$ -спектры могут служить “отпечатками пальцев” для идентификации скрытых веществ.

Ключевая особенность ММН - это измерение времени между регистрацией альфа-частицы и гамма-кванта. Меченые нейтроны 14 МэВ из dt-реакции движутся со скоростью 5 см/нс в сторону исследуемого объекта (рис. 1). Взаимодействуя с атомами вещества объекта, нейтроны рождают  $\gamma$ -кванты, которые попадают в NaI(Tl) детектор. Таким образом, если построить распределение зарегистрированных событий по времени между регистрацией  $\alpha$ -частицы и  $\gamma$ -кванта, то мы получим пик в районе  $t = t_1$ , соответствующего пройденному нейтроном пути  $s = vt_1$  (расстоянию от мишени до объекта). Этот пик будет наложен на плоский фон, соответствующий случайным совпадениям. Т.к. некоррелиро-

ванные (фоновые)  $\gamma$ -кванты могут быть зарегистрированы NaI(Tl) детектором в любое (случайное) время, то такие события не имеют пиковой структуры и распределены равномерно по времени. Нейтроны меченого пучка также могут рассеяться на атомах объекта и тоже попасть в  $\gamma$ -детектор. Для этого им надо пройти расстояние от объекта до детектора и затратить для этого время  $t_2$ . Такие события формируют второй пик, отстоящий от первого на время  $t_2$ . Таким образом, измерение времени между регистрацией  $\alpha$  и  $\gamma$  даёт возможность определить расстояние, пройденное нейтроном до его неупругого рассеяния на ядрах исследуемого объекта. Т.е. возможно получение гамма-спектров, соответствующих определённой выбранной области объекта. Это также сильно подавляет фон (регистрируются только коррелированные события и возможно отстроиться от нейтронов, рассеянных объектом). Высокое отношение сигнал-шум, обеспечиваемое ММН (в 200-300 раз выше по сравнению со стандартными методами), существенно облегчает идентификацию скрытых веществ малой массы. Уникальное преимущество ММН – получение трёхмерного изображения объекта. Использование быстрых нейтронов энергии 14 МэВ значительно увеличивает глубину сканирования в исследуемом объекте.

Ещё одной важной отличительной особенностью ММН является его высокая чувствительность в химическому составу вещества, а не только к его плотности. Мы провели несколько тестов, чтобы подтвердить возможность отличить взрывчатые вещества (ВВ) на фоне других веществ.

## **2. Экспериментальная установка**

### **2.1. Ускоритель и пучок**

Прибор установлен на дейтронном пучке электростатического ускорителя Ван де Граафа в ОИЯИ. Используется молекулярный пучок ионов  $D^+_2$  энергии 450 кэВ на дейтрон. Ток пучка около 0.5 мкА. Пучок на мишени коллимируется двумя диафрагмами диаметром 4 мм. Вещество мишени – тритид титана,  $TiT_2$ , напылённый на пластину из нержавеющей стали. Мишень расположена под углом в  $45^\circ$  относительно оси дейтронного пучка. Плотность атомов трития  $\approx 10^{19}$  атомов/см<sup>2</sup>. Полная активность мишени не превышает 1.7 кюри. Мишень и система управления пучком помещены в вакуумную камеру (рис. 2). Поток нейтронов, рождаемых в d+t реакции, в телесный угол  $4\pi$  составляет  $(1-5) \cdot 10^7$  нейтронов/с.

## 2.2. Альфа-детектор

Альфа-частицы регистрируются матрицей из 4-х сцинтилляционных счётчиков размером  $10 \times 10$  мм каждый. Они расположены на расстоянии 75 мм от мишени. Сцинтилляторы экранируются от дейтронов, рассеянных в мишени, алюминиевой фольгой толщиной 7  $\mu\text{м}$ . Были исследованы различные сцинтилляторы – ZnS, LSO, GSO, YAP. Типичная скорость счёта в альфа-канале  $\sim 10^4 \text{ с}^{-1}$ . Амплитудный спектр альфа-частиц представлен на рис.3. Для контроля альфа-детектора мы наклеили источник  $^{241}\text{Am}$  на обратную сторону мишени. Калибрующий спектр америция представлен на рис.3 умноженным на  $2 \cdot 10^3$ . Слабый хвост в распределении слева от пика америция связан с остаточной радиоактивностью после работы ускорителя.

Средняя энергия зарегистрированных альфа-частиц из dt-реакции около 2.3 МэВ. Это меньше 3.5 МэВ, ожидаемых от dt-реакции, из-за потерь энергии в  $\text{TiT}_2$  мишени ( $\sim 0.4$  МэВ) и в алюминиевой фольге ( $\sim 0.8$  МэВ).

## 2.3. Гамма-детектор

$\gamma$ -лучи из (n, $\gamma$ )-реакций регистрируются NaI(Tl) детектором со сцинтиллятором толщиной 100 мм и диаметром 150 мм. Энергетическое разрешение гамма-детектора  $\Gamma=8\%$  при энергии  $E_\gamma=1.33$  МэВ. Временное разрешение  $\alpha$ - $\gamma$  совпадений определялось в экспериментах, когда пучок меченых нейтронов облучал графитовый куб с ребром 10 см. Временное разрешение  $\alpha$ - $\gamma$  совпадений равно 3.4 нс. Расстояние между исследуемым объектом и гамма-детектором менялось от 30 до 50 см.

Временное разрешение  $\alpha$ - $\gamma$  совпадений определяется двумя факторами. Первый это форма импульса света и световыход как альфа-, так и гамма-детектора. NaI(Tl) детектор – самый медленный элемент, поэтому он ограничивает временное разрешение в наибольшей степени. Вторым фактором это разброс во временах пролёта альфа-частицами расстояния в 75 мм от мишени до альфа-детектора. Этот разброс вызван ионизационными потерями альфа-частиц, испущенных из различных точек слоя  $\text{TiT}_2$  вдоль оси дейтронного пучка. В предположении равномерного распределения альфа-частиц, того, что их средняя энергия равна  $\sim 3.5$  МэВ, разброс составляет 0.70 МэВ. Этот разброс в энергиях соответствует временному разбросу в  $\sim 0.7$  нс. Используя пластиковый счётчик в качестве детектора меченых нейтронов, было измерено временное разрешение  $\alpha$ -n совпадений, оно равно 2.7 нс.

NaI(Tl) детектор экранирован 10 см свинца. Между источником нейтронов и детектором гамма-квантов помещён блок борированного полиэтилена толщиной 35 см.

## **2.4. Пучок меченых нейтронов**

Для определения пространственного положения пучка меченых нейтронов использовался переносной пластиковый сцинтилляционный счётчик размерами  $4 \times 4 \times 0.5$  см<sup>3</sup>. В лабораторной системе отсчёта центр масс dt системы двигается вдоль оси X (см. рис. 2). Это слегка нарушает симметрию разлёта  $\alpha$ -частицы и нейтрона, существующую в системе центра масс. Было обнаружено, что пучок меченых нейтронов отклоняется от нормали к пучку ускорителя на  $\sim 7^\circ$ . Расстояние между тритиевой мишенью и исследуемым объектом менялось от 70 до 130 см. Скорость нейтронов из dt реакции равна 5 см/с.

## **2.5. Система сбора данных**

Система сбора данных построена в стандарте САМАС. Сигналы ФЭУ от  $\alpha$ - и  $\gamma$ -детекторов подаются на дискриминаторы со следящим порогом и на формирователи и, далее, на блок  $\alpha$ - $\gamma$  совпадений вместе с сигналом “busy”, генерируемым контролером. Контроллер оснащён процессором. Блок  $\alpha$ - $\gamma$  совпадений генерирует сигнал прерывания для процессора и строб для аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Сигналы с ФЭУ проходят через усилители и подаются на АЦП, который формирует амплитудный спектр. Для проведения временного измерения сигнал от  $\alpha$ -детектора проходит формирование и подаётся на старт временно-цифрового преобразователя (ВЦП), а сигнал от  $\gamma$ -детектора подаётся на стоп ВЦП. Выборка  $\alpha$ - $\gamma$  совпадений производится во временных воротах шириной 80 нс. Контроллер крейта со встроенным РС производит чтение данных из преобразователей и производит контроль сбора данных. Информация по локальной сети передаётся на обрабатывающий компьютер.

## **3. Результаты**

### **3.1. Временное распределение и подавление фона**

Для иллюстрации принципиальных преимуществ ММН рассмотрим временное и энергетическое распределения регистрируемого NaI(Tl) детектором характеристического  $\gamma$ -излучения от исследуемого вещества. Типичный время-пролётный спектр представлен

на рисунке 4а. Он был получен от образца углерода рамерами  $10 \times 10 \times 10 \text{ см}^3$ , расположенного на расстоянии 70 см от тритиевой мишени. Старт время-пролётным измерениям даёт сигнал от  $\alpha$ -частицы, а стоп – сигнал от  $\gamma$ -кванта. Если сигнал от  $\gamma$  не получен, то через 80 нс после получения сигнала от  $\alpha$ -частицы генерируется принудительный сигнал “стоп”.

Двухпиковая структура временного спектра наложена на плоский фон, отчётливо видный на рис. 4а. Плоская компонента спектра соответствует случайным  $\alpha$ - $\gamma$  совпадениям. Первый пик соответствует регистрации  $\gamma$ -квантов отклика из  $A(n, n'\gamma)A$  реакций взаимодействия меченых нейтронов с образцом. Второй пик соответствует нейтронам, рассеявшимся в образце, и зарегистрированным NaI(Tl) счётчиком позже. Расстояние между пиками составляет 10 нс, что соответствует расстоянию в 50 см, проходимому нейтронами энергии 14 МэВ. Чистое разделение двух пиков позволяет лучше отстроиться от фона.

Рис. 4б показывает спектр  $\gamma$ -квантов, соответствующих временным воротам I, показанным на рис. 4а заштрихованной областью в районе 35 нс. Можно видеть чёткую двухпиковую структуру фотопика углерода с энергией 4.43 МэВ с его первым пиком утечки. Рис. 4с показывает энергетический спектр для временных ворот II обозначенных на рис. 4а заштрихованной областью в районе 45 нс. Этот спектр гладкий, без каких-либо признаков углеродной линии в районе 4.43 МэВ. Это распределение типично для нейтронов, перерассеянных в графитовом кубе.

Этот рисунок иллюстрирует два основных преимущества ММН. Во-первых, знание времени пролёта предоставляет информацию о пространственном положении исследуемой области. Во-вторых, выбор  $\alpha$ - $\gamma$  совпадений из определённого временного интервала позволяет чрезвычайно подавить фон. Без выборки по времени результирующий  $\gamma$ -спектр это суперпозиция энергетического спектра от исследуемого вещества (рис. 4б), фонового  $\gamma$ -излучения и фона от рассеянных нейтронов, как на рис. 4с. Подавление фона существенно для повышения чувствительности, нужной для идентификации малых объектов.

Большая величина отношения сигнал/шум – важное преимущество ММН. На рис.5 сравниваются энергетические спектры  $\gamma$ -квантов, полученных традиционным методом облучения 14 МэВ нейтронами, без  $\alpha$ - $\gamma$  совпадений (левый ряд), со спектрами для тех же образцов, полученных с использованием ММН (правый ряд) с выборкой событий в первом пике совпадений, как на рис. 4а. Верхний ряд показывает спектры для углеродного блока (2.4 кг), а нижний соответствует имитатору ВВ, меламину ( $C_3H_6N_6$ ). Спектры, полученные с использованием ММН, демонстрируют чёткие  $\gamma$ -линии  $^{12}C$  на 4.43 МэВ,  $^{14}N$  на 5.10 и 2.30 МэВ, а также соответствующие пики утечки (single escape, SE). В случае обыч-

ного облучения эти пики наложены на большой фон. Соотношение сигнал-шум для ММН больше, чем для обычного метода в 200-300 раз.

На рис. 6 представлены спектры различных сложных веществ. Заштрихованные области обозначают фон, который можно измерить и вычесть. Видно, что спектры без селекции событий по времени имеют очень размытые пики и большую фоновую подложку. Выборка событий по времени делает пики чёткими и сильно подавляет фон.

Высокое отношение сигнал-шум существенно облегчает детектирование малых количеств скрытых веществ. На рис.7 показаны энергетические спектры  $\gamma$ -квантов от образцов меламина массы 1600 г(верхний), 570 г (средний) и 200 г (нижний). Слева показаны спектры без селекции по времени, справа – с использованием ММН. Можно видеть, что типичные для меламина  $\gamma$ -линии сохраняются даже для образца малой (200 г) массы, в то время как для метода без селекции событий по времени пиковая структура становится нечёткой при уменьшении массы образца.

### **3.2. Идентификация скрытых веществ**

Для идентификации скрытых веществ эксперименты проводятся в три этапа. Во-первых, проводится измерение фоновых условий в лаборатории. Во-вторых, проводится измерение опорного спектра от незранированного запрещённого вещества. В-третьих, проводится испытание с экранированным исследуемым образцом. Процесс идентификации основан на сравнении спектра исследуемого вещества с опорным. Были проверены различные алгоритмы принятия решений.

Спектры различных веществ имеют особенности, отличающие их друг от друга. Это наличие или отсутствие в спектре каких-либо линий, их относительная интенсивность. На рис. 8 представлены характеристические  $\gamma$ -спектры сахара (содержит углерод и кислород), меламина (азот и углерод), углерода и воды (кислород). Видно, что, хотя спектры некоторых веществ имеют схожие особенности, все они различаются. На поиске отличий анализируемого спектра от опорного построен алгоритм идентификации.

Для демонстрации потенциала ММН, мы представляем здесь результаты экспериментов по идентификации ТНТ ( $C_7H_5N_3O_6$ ). Образец ТНТ массы 400 г закопан в ящик с землёй. Образец экранирован 25 см земли со стороны пучка нейтронов и 9 см земли со стороны NaI(Tl). Мы измерили спектр ТНТ, закопанного в ящик, и спектр ящика земли без меламина. Результаты представлены на рис. 9.

Временное распределение  $\gamma$ -квантов для ТНТ в земле показано на первом графике (верхний ряд, слева) сплошной линией, временное распределение  $\gamma$ -квантов для ящика без ТНТ показано пунктирной линией. Распределения нормированы на равное число меченых

нейтронов. Можно видеть, что эти два распределения различны. На следующем графике (верхний ряд, справа) показана разность этих двух распределений. Картинка демонстрирует большой пик на временном интервале пролёта в 22-27 нс. Это указывает на то, что что-то здесь скрыто.

Эти два графика демонстрируют важное преимущество ММН, возможность локализовать положение запрещённого вещества вдоль оси нейтронного пучка. Важно заметить, что узкий пик на разностном спектре рис. 6 (верхний, справа) это “отпечаток пальца” скрытого ТНТ. Для других веществ (как дерево или камень) разностный спектр представляет собой провал, а не пик. Вообще говоря, форма разностного спектра зависит от разницы химических составов скрытого вещества и состава почвы.

Нижний ряд на рис. 9 показывает разницу энергетических спектров для тестов с ТНТ и без него. Эта разница должна быть нуль в той части ящика с землёй, где нет ТНТ.

И на самом деле, разница энергетических спектров практически нулевая для временного слоя  $\Delta t=17-22$  нс (нижний ряд, слева) и для временного среза  $\Delta t=27-32$  нс (нижний ряд, справа). Однако, в районе пика на разностном временном спектре,  $\Delta t=22-27$  нс, разница энергетических спектров также обнаруживает спектр с ненулевым числом событий. Спектр похож, но не совпадает со спектром неэкранированного ТНТ. Это происходит из-за вычета  $\gamma$ -спектра почвы из  $\gamma$ -спектра ТНТ (так как построена разность спектров земли и ТНТ). Для того, чтобы сделать возможным выделение конечного чистого  $\gamma$ -спектра ТНТ, нам надо улучшить пространственное разрешение до величины меньшей, чем размеры образца ТНТ, имеющего форму цилиндра высотой 6 см и диаметром 6 см. Это позволит получать чистый спектр образца непосредственно селекцией по времени, без подбора правильного фона.

Для демонстрации возможности метода идентификации ВВ, в окружение других объектов, образец ТНТ массой 400 г был помещён в стандартный чемодан (рис. 10), размера  $33 \times 45 \times 15$  см<sup>3</sup>, расположенный на расстоянии 70 см от тритиевой мишени. Ширина чемодана вдоль меченого пучка – 33 см. Чемодан разделён на 4 равных отделения. Два пучка меченых нейтронов одновременно облучают чемодан. Каждый пучок проходит через два отделения чемодана. Образец помещается в одно из отделений, в то время как оставшиеся отделения заполняются различными фоновыми веществами. Программа идентификации должна определить, в котором отделении находится образец ТНТ.

Образец ТНТ помещён в одно из отделений, а в три оставшихся отделения находятся углеродные кубы массой 2.5 кг каждый. Правильная идентификация происходит после 60 с облучения. При этом в 4 успешных испытаниях образец находился в разных отделениях. Интенсивность нейтронного пучка была  $2 \times 10^7$  н/с. В другом испытании мы пытаемся уз-

нать положение образца меламина массой 1 кг на фоне образцов соли, стирального порошка и почвы той же массы. Образцы экранированы 5 мм стальным листом, и 10 мм стальной лист помещён между ними и NaI(Tl) детектором. Длительность каждого испытания – 300 секунд. Алгоритм поиска опасного вещества основан на сравнении спектра вещества с опорным спектром. Программа идентификации ищет спектр, наиболее похожий на опорный. На рис. 11 представлена стандартная распечатка спектров, сделанная программой. Синей линией показан опорный спектр (меламин). На четырёх графиках представлены амплитудные спектры, соответствующие четырём пространственным ячейкам. В этом испытании в первой ячейке (верхний левый график) находится стиральный порошок, во второй (верхний правый) – земля, в третьей (нижний левый) – поваренная соль. Меламин находится в четвёртой (правый нижний график) ячейке. Видно, что спектр в четвёртой ячейке наиболее похож на опорный. Графический интерфейс программы помечает опасную область красным цветом, а неопасные – зелёным (рис. 12). Кроме определения опасного вещества программа вычисляет типичные характеристики спектров, такие как отношение С к О (относительные концентрации углерода и кислорода в веществе), число событий в фотопиках азота, кислорода и углерода. В 27 испытаниях из 30 программой было дано правильное указание местоположения меламина.

Для получения некоторых типичных характеристик идентификации ВВ, мы поместили в чемодан образцы меламина и почвы массой 100 г и экранировали их 9 см почвы перед чемоданом и 9 см почвы на NaI(Tl) детекторе (рис 13). Интенсивность нейтронного пучка составляет  $4 \times 10^7$  н/с. Правильная идентификация получена после 300 секунд. Дополнительная экранировка 4 см воды не изменяет результатов идентификации. Действительно, быстрые нейтроны не очень чувствительны к влажности почвы по сравнению с методами, основанными на использовании тепловых нейтронов [7, 8, 9].

В другом испытании вёлся поиск 400 г ТНТ, экранированного 42 см почвы, помещёнными перед чемоданом, и слоем земли в 30 см, помещённым перед NaI(Tl) детектором. Пучок нейтронов имеет интенсивность  $4 \times 10^7$  н/с. Правильная идентификация происходит через 180 секунд. Этот результат демонстрирует высокий потенциал ММН для идентификации глубоко закопанных ВВ.

#### **4. Выводы**

Мы исследовали основные параметры лабораторного прототипа установки на основе ММН для удалённой идентификации ВВ, скрытых в контейнере или почве. Прототип построен на основе электростатического ускорителя Ван де Граафа, ОИЯИ.

Проведенные исследования и их анализе приводит к следующим заключениям:

1. ММН способен идентифицировать ВВ, скрытые в контейнерах и почве. В экспериментах с нейтронным потоком  $4 \times 10^7$  н/с мы идентифицируем 400 г ТНТ, экранированного 42 см почвы за 3 минуты. 100 г меламина, экранированные 9 см почвы, обнаруживаются за 5 минут.

2. Важная отличительная особенность ММН – его чувствительность к химическому составу скрытого вещества. Мы продемонстрировали возможность отличать ВВ от других окружающих его веществ.

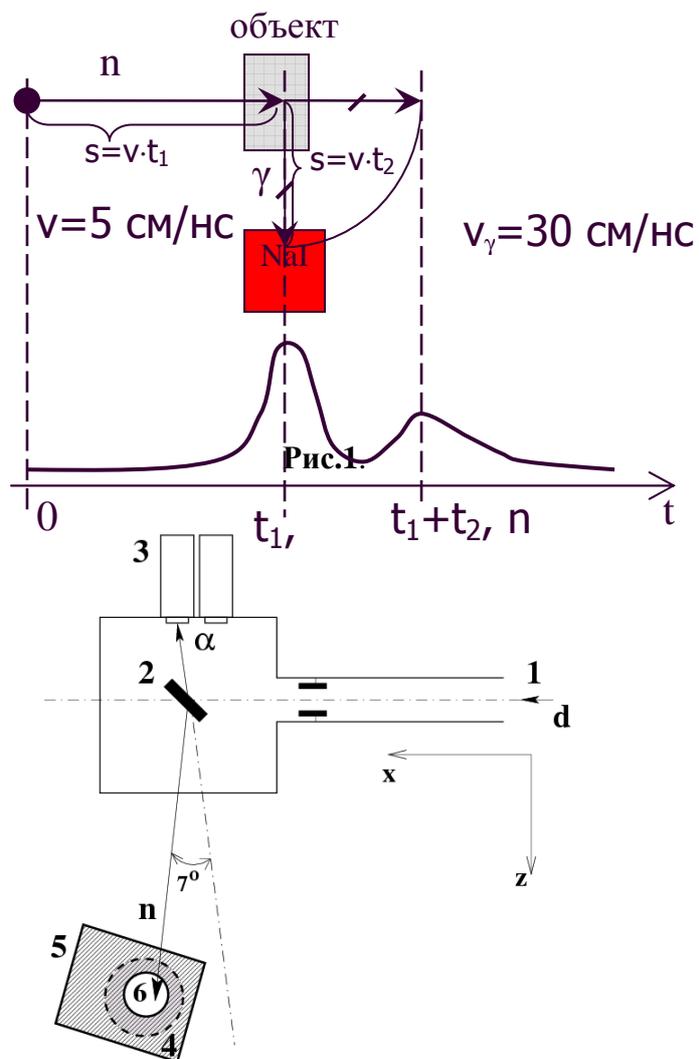
3. Эксперименты показывают, что ММН превосходит остальные методики, использующие нейтронный поток для исследования объектов, так как ММН имеет более высокое отношение сигнал-шум (на фактор 200-300) и, следовательно, более высокую чувствительность. Только ММН может получить трёхмерное изображение скрытого объекта. Оба преимущества, используемые вместе, существенно облегчают идентификацию скрытых опасных веществ.

## Ссылки

1. L.I.Ussery et al. Los Alamos Nat. Lab report LA12847-MS (October 1994).
2. E.Rhodes et al., SPIE, v. 2092, p. 288 (1993); E.Rodes, C.E. Dickerman, T. Brunner, A.Hess, S. Tyliniski. APSTING: Associated Particle Sealed Tube Neutron Generator Studies for Arms Control. ANL report ANL/ACTV-95/1 (1994)
3. J.P.Hurley et al. Current status of the Associated Particle Imaging System at STLEGG 10617-3008 (January 1992).
4. G.Viesti et al., The EXPLODET project: advanced nuclear techniques for humanitarian demining. Nucl. Instr. and Meth., A422 (1999) 918. G.Viesti et al., preprint DFPD 9/NP/43.
5. V.M. Bystritsky et al., Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on Technology and Mine Problem, Naval Postgraduate School, March 13 – 16, Monterey, California, 2000.
6. B.C.Maglich et al., Atometry. Hienergy Report, Hien 98-111, Sept. (1998).
7. C.Bruschini, Commercial systems for the direct detection of explosives, 2001.  
<http://diwww.epfl.ch/lami/detect/>.
8. Vit. M. Bystritskii, Multisensor Fusion, NATO Science Series, II. Mathematics, Physics and Chemistry, Edited by A.K.Hyder, E.Shahbazyan and E.Waltz, Kluwer Academic Publishers, vol.70(2002) 673; Landmine Problem and Multisensor Detection, Proceedings of the NATO Ad-

vanced Research Workshop on Multisensor Data Fusion, Pitlochry, Perthshire, Scotland, June 25-July 7,2000.

8. G. Pekarsky. Multisensor technology for Buried Mines Detection, in Proceedings 2<sup>nd</sup> Intern. Conf. on Detection of Abandoned Land Mines, Edinburg, UK, 12-14 October 1998, London, p. 147-151.



**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки.

1. Дейтронный канал ускорителя.
2.  $\text{TiT}_2$  мишень.
3. Альфа детектор.
4. Гамма детектор(пунктирная линия).
5. Исследуемый объект
6. Спрятанный имитатор ВВ.

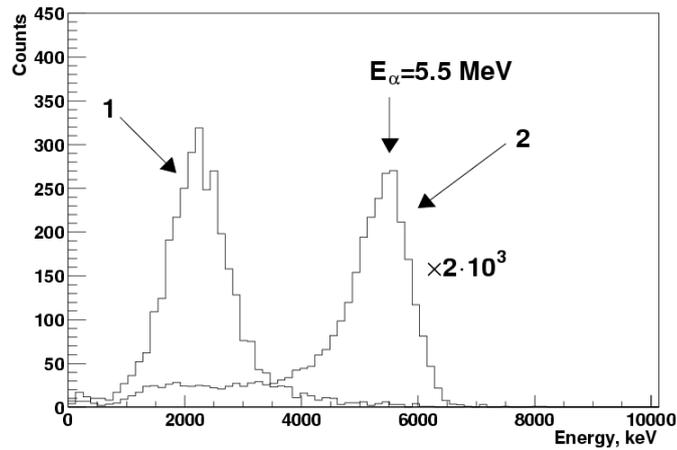


Рис 3. Энергетический спектр  $\alpha$ -частиц (1). Калибровочный спектр  $^{241}\text{Am}$  (2), умножен на фактор  $2 \cdot 10^3$  (2).

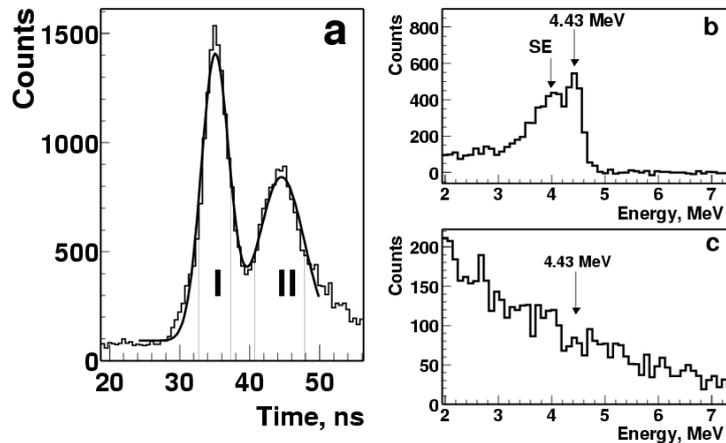
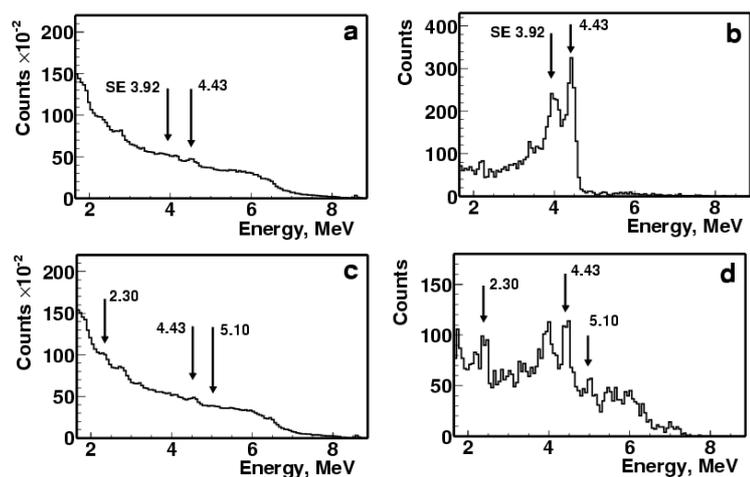
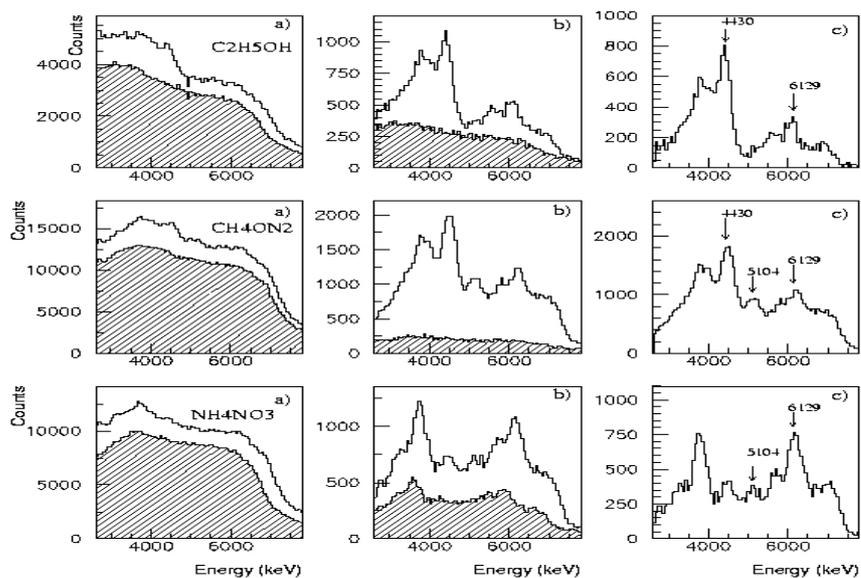


Рис 4. Времяпролётный спектр  $\alpha - \gamma$ -совпадений для 10 см куба  $^{12}\text{C}$  (а). Энергетический спектр  $\gamma$ -квантов для временного интервала I, указанного заштрихованной областью, (b) и временного интервала II (c). Углеродная линия 4.43 МэВ и её первый пик утечки (single escape, SE) отчётливо видны на (b).

Ширина первого пика (I) на (a) равна  $\Gamma = 4.3 \pm 0.5$  нс.



**Рис 5.** Энергетические  $\gamma$ -спектры углеродного блока (верхняя часть) и меламина (низ) без выбора по времени (слева) и с выборкой по времени (справа).



**Рис 6.** Энергетические  $\gamma$ -спектры образцов различных веществ.

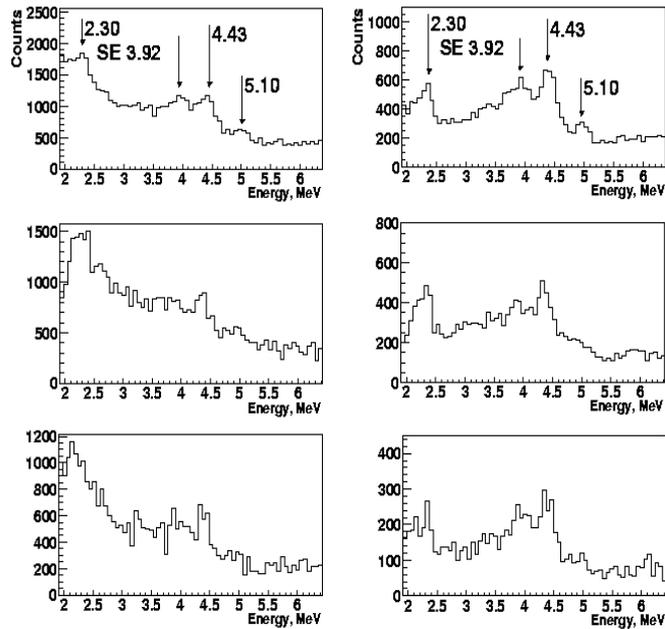
Сверху вниз: этиловый спирт, мочеви́на, нитрат аммония.

а) Без выборки событий по времени;

б) С выборкой событий по времени;

с) С выборкой по времени и с вычетом фона.

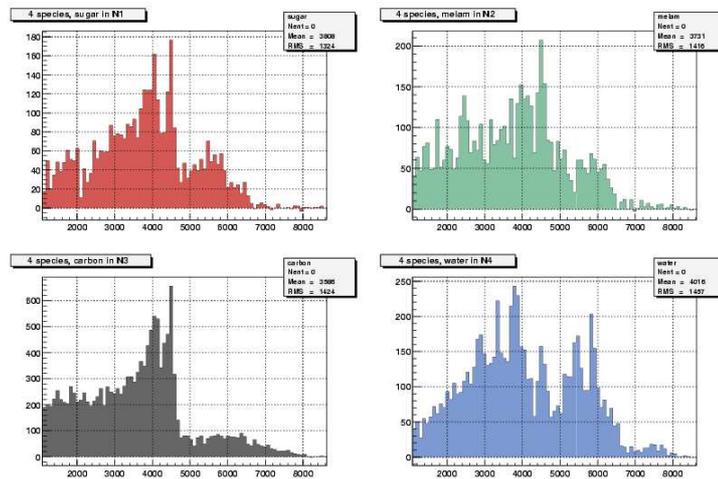
Заштрихованная область – вклад фона в энергетический спектр.



**Рис 7.** Энергетический  $\gamma$ -спектр образцов меламина различных масс.

Левый ряд – без селекции событий по времени, правый ряд – с селекцией событий, соответствующих взаимодействиям в объекте.

Массы образцов: 1600 г (верхний), 570 г (средний) и 200 г (нижний).



**Рис 8.** Энергетические  $\gamma$ -спектры образцов различных веществ.

Слева направо, сверху вниз: сахар, меламин, углерод, вода.

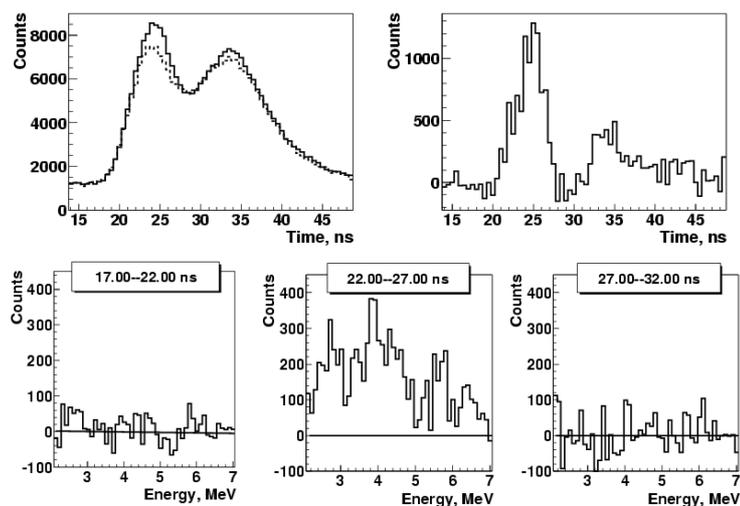


Рис 9. Временной и энергетический спектры  $\gamma$ -квантов ТНТ, закопанного в ящик с землёй. Верхний ряд, слева – временное распределение  $\gamma$ -квантов ТНТ закопанного в земле показано сплошной линией, временное распределение для ящика с землёй без ТНТ показано штриховой линией. Верхний ряд, справа – разница между временными распределениями ящика с ТНТ и ящика без ТНТ. Нижний ряд – разница энергетических спектров  $\gamma$ -квантов для испытания с ТНТ и без него.



Рис 10. Стандартный чемодан с четырьмя образцами для идентификации.

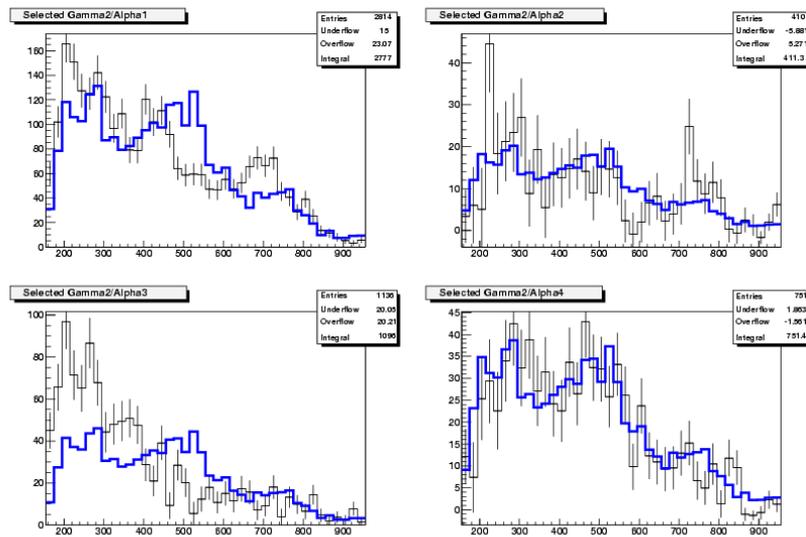


Рис 11. Распечатка, сделанная программой идентификации во время анализа спектров. Синим показан опорный спектр (спектр меламина). Анализируются спектры следующих веществ, слева направо, сверху вниз: стиральный порошок, земля, поваренная соль, мела-МИН.

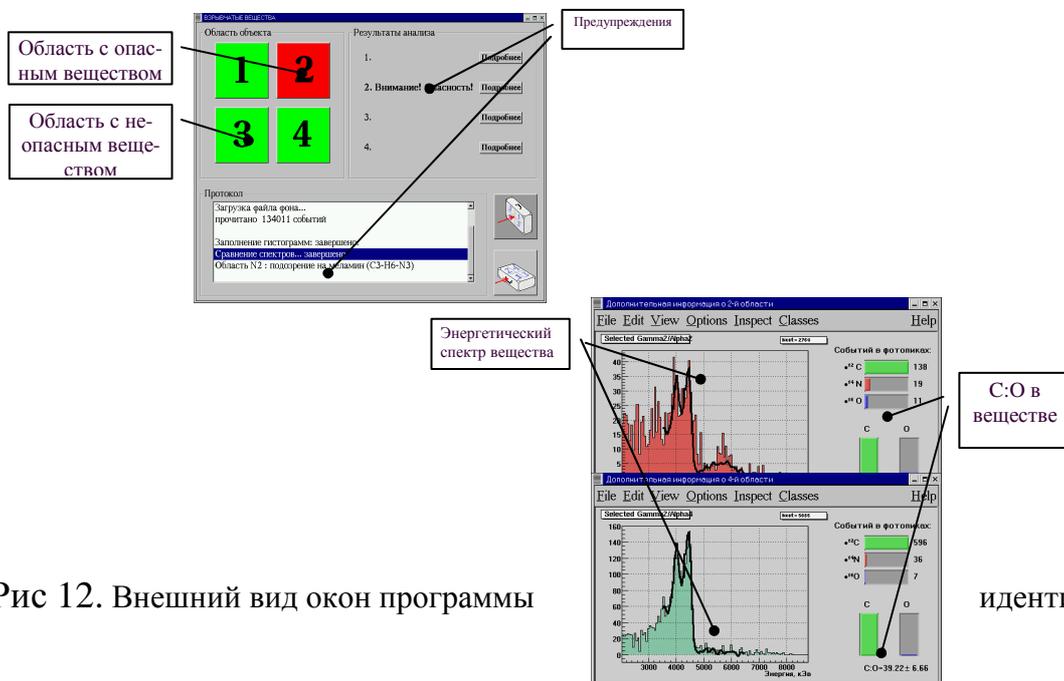


Рис 12. Внешний вид окон программы



Рис 13. Опыт с ТНТ, экранированным 9 см земли по пучку (ящики слева от чемодана) и 9 см земли на NaI(Tl) детекторе (ящик под чемоданом).