# Стационарная установка для обнаружения взрывчатых веществ на основе метода меченых нейтронов

Быстрицкий В.М., Замятин Н.И., Зубарев Е.В., Рапацкий В.Л.,
Рогов Ю.Н., Садовский А.Б., Саламатин А.В., Сапожников М.Г., Слепнев В.М.

*Объединенный институт ядерных исследований, Дубна*

Романов И.В., Сафонов М.В., Филиппов А.В.

*Федеральная служба безопасности РФ*

Аннотация

Обсуждаются результаты эксплуатации стационарной установки по обнаружению и идентификации взрывчатых веществ методом меченых нейтронов. Источником потока меченых нейтронов с энергией 14.1 МэВ является портативный нейтронный генератор ИНГ-27, производства ВНИИА, со встроенным 64-пиксельным кремниевым альфа – детектором с двухсторонним стриповым съемом, разработанным в ОИЯИ. Созданная установка была протестирована на идентификацию более 30 взрывчатых веществ.

## 1. Введение

Детекторы взрывчатых веществ (ВВ), использующие технологию метода меченых нейтронов (ММН), получили в последнее время широкое распространение [1-5]. Главное преимущество ММН состоит в том, что он позволяет определять элементный состав вещества, а не контраст плотности как обычные X- и $\gamma$-лучевые сканеры.

В ММН используются быстрые нейтроны с энергией 14 МэВ, которые образуются в бинарной ядерной реакции $d+t \rightarrow \alpha+n$. Каждый нейтрон метится путем регистрации сопутствующей $\alpha$-частицы специальным $\alpha$-детектором, что обеспечивает определение направления вылета нейтрона. Меченые нейтроны облучают объект досмотра и индуцируют реакции неупругого рассеяния $A(n,n'\gamma)A$, в результате которых испускаются $\gamma$-кванты с энергетическим спектром, характерным для каждого химического элемента составляющего объект досмотра. Характеристические $\gamma$-кванты регистрируются в совпадениях с сигналом от $\alpha$-частицы. Измерения временного интервала между сигналами с $\alpha$- и $\gamma$-детекторов дает возможность измерить расстояние до точки, из которой был испущен $\gamma$-квант, поскольку скорость нейтрона постоянна и равна 5 см/нс. Таким образом, имеется возможность определить все три координаты области, из которой произошло $\gamma$-излучение.

Мечение нейтронов дает возможность измерить время между моментом образования нейтрона и моментом взаимодействия его с веществом облучаемого объекта, что, в свою очередь, позволяет производить отбор событий, зарегистрированных гамма – детектором в совпадениях с сигналом с альфа-детектора в течение определенного временного интервала. Это приводит к резкому уменьшению уровня фона. Показано [6-9], что использование ($\alpha$-$\gamma$)-совпадений уменьшает отношение фон-сигнал более, чем в 200 раз, что существенно улучшает условия обнаружения скрытых веществ.

Важно, что идентификация скрытых ВВ происходит автоматически, без участия оператора.

Стационарная установка для обнаружения ВВ на основе технологии ММН была разработана в ОИЯИ (Дубна) по заказу ФСБ РФ. Стационарная установка была установлена и испытана в Межрегиональном центре по исследованию и обезвреживанию взрывных устройств ФСБ РФ [10]. Установка использовала портативный нейтронный генератор с встроенным 9-канальным $\alpha$-детектором. Позже она была улучшена путем использования нейтронного генератора, позволяющего создать 64 пучка меченых нейтронов, а также было разработана новая программа принятия решений.

В данной работе приводятся результаты эксплуатации модифицированной стационарной установки.

## 2. Описание установки

Стационарная установка расположена в специальном боксе лаборатории Межрегионального центра по исследованию и обезвреживанию взрывных устройств ФСБ РФ. Общий вид установки показан на Рис.1.

Рис 1. Общий вид стационарной системы для идентификации ВВ.

В состав установки входит портативный нейтронный генератор (НГ) со встроенным альфа-детектором, обеспечивающим создание 64 пучков меченых нейтронов. Гамма-кванты, возникающие при облучении объекта досмотра мечеными нейтронами, регистрируются двумя гамма-детекторами на основе кристаллов BGO. Сигналы с $\alpha$- и $\gamma$-детекторов в совпадениях анализируются системой сбора и обработки информации и направляются в основой компьютер обработки данных, где программа принятия решений производит анализ вещества объекта досмотра. Результаты обработки отображаются на интерфейсе пользователя.

Нейтронный генератор ИНГ-27 разработан Всероссийским Институтом автоматики им. Н.Л.Духова (Москва) и имеет следующие характеристики:

| | |
|---|---|
| Максимальная интенсивность | $1{\cdot}10^8$ $c^{-1}$ |
| Энергия нейтронов | 14.1 МэВ |
| Режим нейтронного излучения | постоянный |
| Питание | 200±5 В |
| Максимальная мощность | 40 Вт |
| Размер нейтронного генератора | 130x279x227 мм |
| Вес | 8 кг |
| Время жизни | 800 часов |

В ОИЯИ разработан и сконструирован кремниевый $\alpha$-детектор, встраиваемый в нейтронный генератор. Двухсторонний стриповый детектор содержит по 8 взаимно перпендикулярных стрипов на каждой стороне, которые образуют матрицу 8x8 с размером каждого элемента 4x4 мм$^2$. Полный размер чувствительной области 64 элементного $\alpha$-детектора составляет 32x32 мм$^2$. Альфа детектор расположен на расстоянии 80 мм от тритиевой мишени. На Рис.2 показан общий вид $\alpha$-детектора.

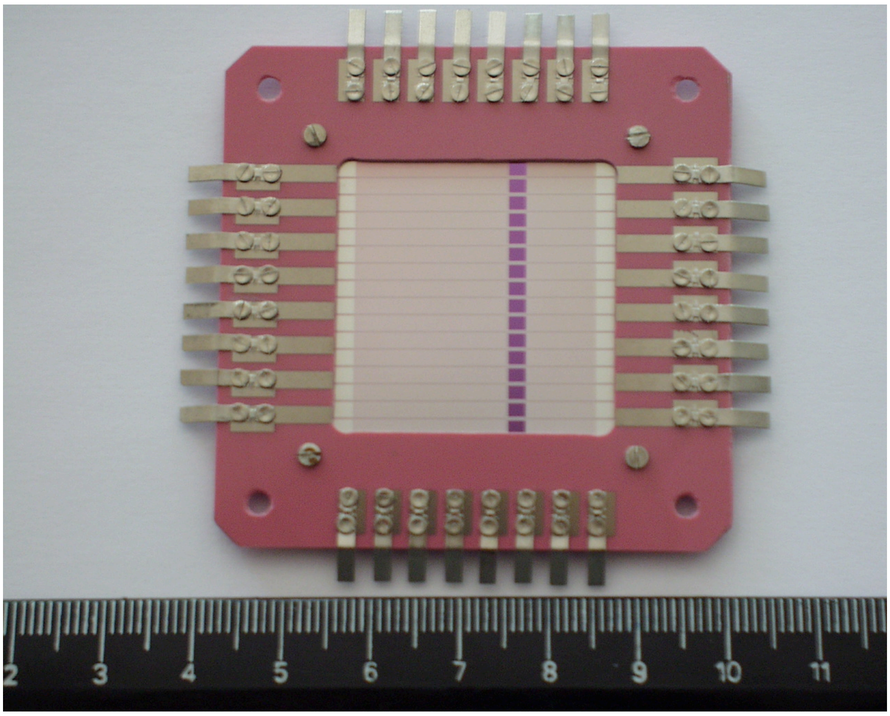


Рис. 2. Общий вид 64-элементного альфа-детектора.

Предусилители сигналов альфа-детектора монтируются в задней части НГ.

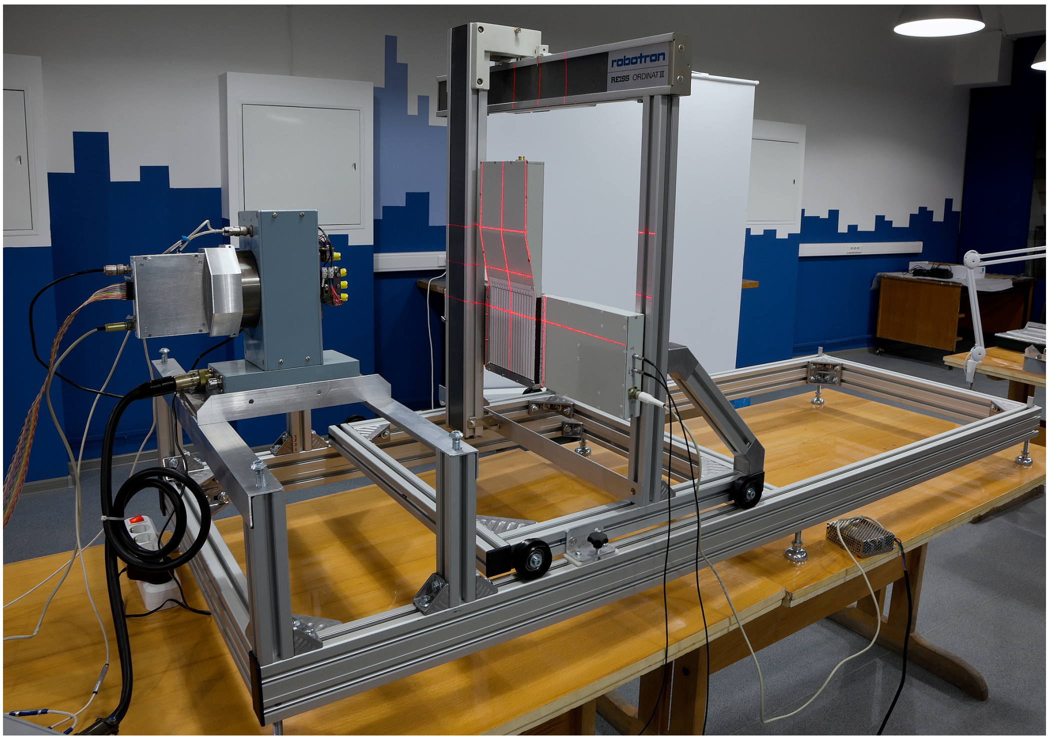

Рис. 3 Стенд для измерения пространственных характеристик меченых пучков.

Для измерения пространственных характеристик меченых пучков нейтронов сконструирован специальный стенд. Он состоит из двух нейтронных детекторов на основе пластиковых сцинтилляторов в виде стрипов с ортогональной их ориентацией. Каждый детектор состоит из 16 светоизолированных стрипов, съем света с которых на фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) осуществляется с помощью файберов. Размер стрипа 7.5 x 15 мм, толщина стрипа - 5 мм. Файберы просматриваются 16 канальным ФЭУ, считывание осуществляется специальной платой электроники с изменяемым амплитудным порогом в каждом канале. Созданный стенд существенно облегчает измерение пространственных характеристик меченых пучков, поскольку позволяет одновременно определять обе пространственные координаты каждого из меченых пучков в плоскости, перпендикулярной направлению нейтронного пучка.

На Рис.4 приведены пространственные распределения меченых пучков, полученные при условии совпадения сигналов с каждого из 8 вертикальных стрипов с сигналом с одного и того же горизонтального стрипа. На расстоянии 300 мм от НГ ширины меченых пучков в среднем составляют $\Gamma_X = 14.6\pm0.9$ мм и $\Gamma_Y = 14.8\pm1.1$ мм, соответственно. Измеренные значения находятся в хорошем согласии с результатами расчета в предположении точечного дейтронного пучка, падающего на мишень.

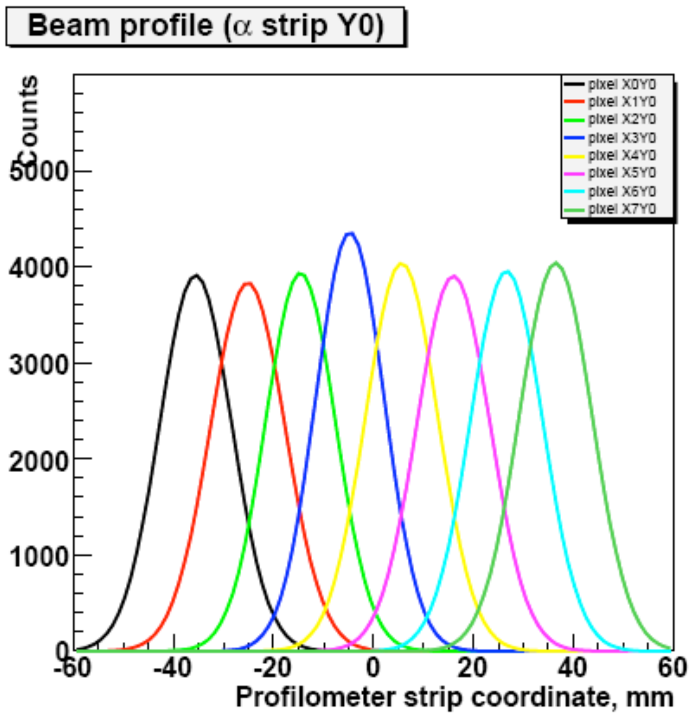


Рис. 4. Пространственное распределение 8 меченых пучков.

Для регистрации гамма-квантов, образующихся при облучении объектов досмотра потоком меченых нейтронов, используются два гамма-детектора на основе кристаллов BGO диаметром 100 мм и толщиной 70 мм. Кристаллы были изготовлены Институтом неорганической химии Сибирского отделения РАН. Энергетическое разрешение гамма – детекторов на линии углерода $E_\gamma$ = 4.43 МэВ составляет Г=5.4 ± 0.2 %.

Система сбора и обработки информации (СОИ) была разработана на основе электронной платы сбора информации на 32 канала. В ее состав входило также соответствующее программное обеспечение, которое включало основной модуль (драйвер), программу управления и программу реконструкции. Плата сбора информации обеспечивает прямое цифровое преобразование импульсов сигналов, приходящих от альфа- и гамма- детекторов. Она имеет встроенные триггерные схемы для работы в трёх режимах: временном, энергетическом одноканальном и в режиме альфа-гамма совпадений. Используя программное обеспечение, можно точно восстановить амплитудные и временные характеристики сигнала.

Разработанная система электропитания для гамма-детекторов, выходной электроники альфа-детекторов и нейтронного генератора вместе с ПК и СОИ занимает крейт, расположенный в нижней части установки (см. Рис.1).

Общий вид интерфейса пользователя показан на Рис. 5. Зона досмотра делится на 64 элементарных объема - вокселя. Размер вокселя в плоскости перпендикулярной направлению нейтронного пучка определяется размером соответствующего меченого пучка. Зона досмотра в глубину делится на 7 областей, которые схематично показаны на полосе слева на Рис. 5.

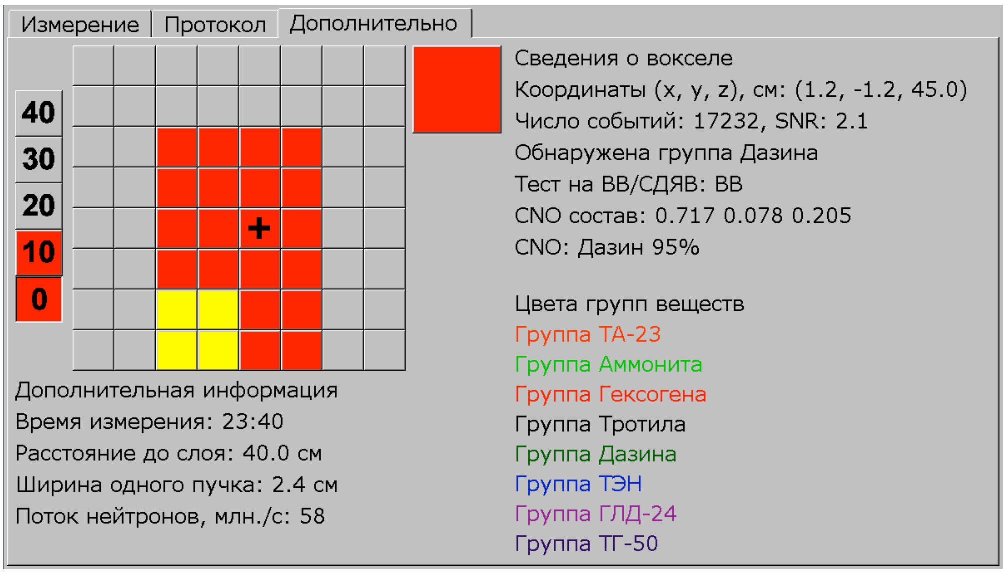


Рис. 5. Общий вид интерфейса пользователя.

Если подозрительное вещество находится в каком-либо из вокселей, соответствующая ячейка интерфейса пользователя окрашивается в красный цвет. В дополнительном окне интерфейса возможно отображение энергетического спектра зарегистрированных γ-квантов.

## 3. Результаты испытаний

Стационарная установка эксплуатируется в течение двух лет. За это время было выполнено большое число тестов с различными типами ВВ и обычными веществами.

Список ВВ, которые использовались для проверки алгоритма принятия решений приведен в Таблице 1.

Таблица 1. Список ВВ обнаруживаемых стационарной установкой.

| №№ | Вещество | №№ | Вещество |
|---|---|---|---|
| 1 | Тетрил | 16 | A-IX-3T |
| 2 | Окфол | 17 | ГЛД-24 |
| 3 | Гексоген | 18 | Изопропилнитрат |
| 4 | Тринитробензол | 19 | Окфал-20 |
| 5 | ТНТ | 20 | ОЛА-8Т |
| 6 | ТЭН | 21 | Сейсмон |
| 7 | Октоген | 22 | Пентолит |
| 8 | ЛД-70 | 23 | ПВВ-85 |
| 9 | Гексанитростильбен | 24 | ТГА-16 |
| 10 | Дазин | 25 | ТМ |
| 11 | ТАТБ | 26 | Токаф. А |
| 12 | ПВВ-5А | 27 | Селитра |
| 13 | ТС | 28 | ТА-23 |
| 14 | Окфол-3.5 | 29 | Аммонит-19 |
| 15 | ТГ-50 | 30 | ПВВ-7 |

Анализ спектров гамма-квантов велся в двух режимах: обнаружения и идентификации ВВ. В режиме обнаружения ВВ программа принятия решений (ППР) должна определить, является ли вещество опасным или нет. Типичное время обнаружения составляет 4 мин. В режиме идентификации происходит классификация опасного вещества к той или иной группе ВВ. Для идентификации требуется набирать статистику в течение 16-20 мин.

Стандартный подход состоит в идентификации ВВ по определению относительных выходов характеристического излучения углерода, азота и кислорода (CNO–метод). Однако, некоторые ВВ имеют абсолютно одинаковые соотношения выходов C:N:O. Например, в CNO- методе невозможно отличить октоген ($C_4 H_8 O_8 N_8$) от гексогена ($C_3 H_3 O_6 N_6$). Поэтому для целей идентификации ВВ из Таблицы 1 были разбиты на 9 классов, объединяющих вещества с похожими соотношениями C:N:O.

Отдельные смесевые ВВ содержат помимо основного ВВ различные добавки, факт наличия которых можно использовать при идентификации. Например, токаф на 60% состоит из октогена, а остальное составляют различные добавки, в том числе, алюминия (17%). Эти добавки меняют энергетический спектр токафа и дают принципиальную возможность его идентификации. На Рис. 6 спектр токафа сравнивается со спектром гексогена.

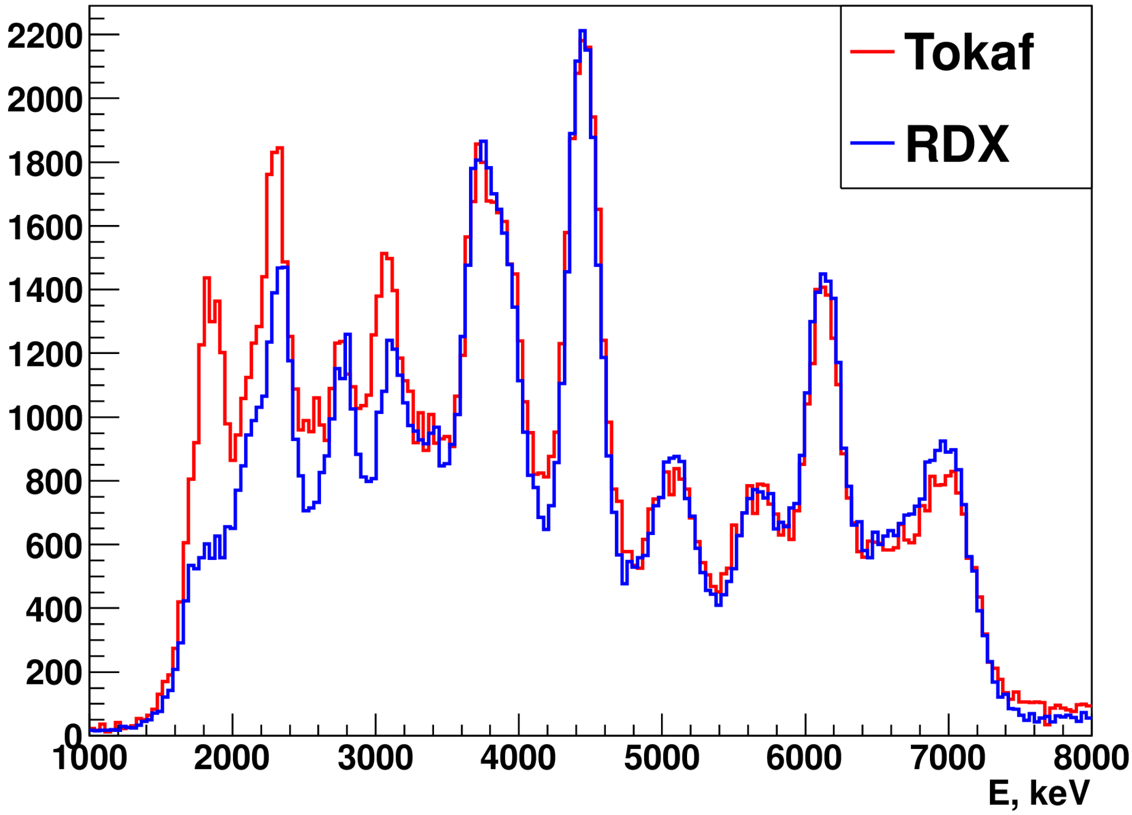


Рис. 6. Энергетический спектр гамма-квантов от токафа (красная линия) и гексогена (синяя линия).

Видно, что в спектры токафа и гексогена практически совпадают в области линий углерода (4.43 МэВ), азота (5.1 МэВ) и кислорода (6.13 МэВ). Однако наличие алюминия в токафе проявляется в пиках при низкой энергии гамма-квантов в районе 2.2 МэВ.

Аналогичная картина наблюдается при сравнении спектров ТНТ и ТА-23, который на 77% состоит из ТНТ и 17% алюминия. Спектры ТА-23 и ТНТ сравниваются на Рис.7.

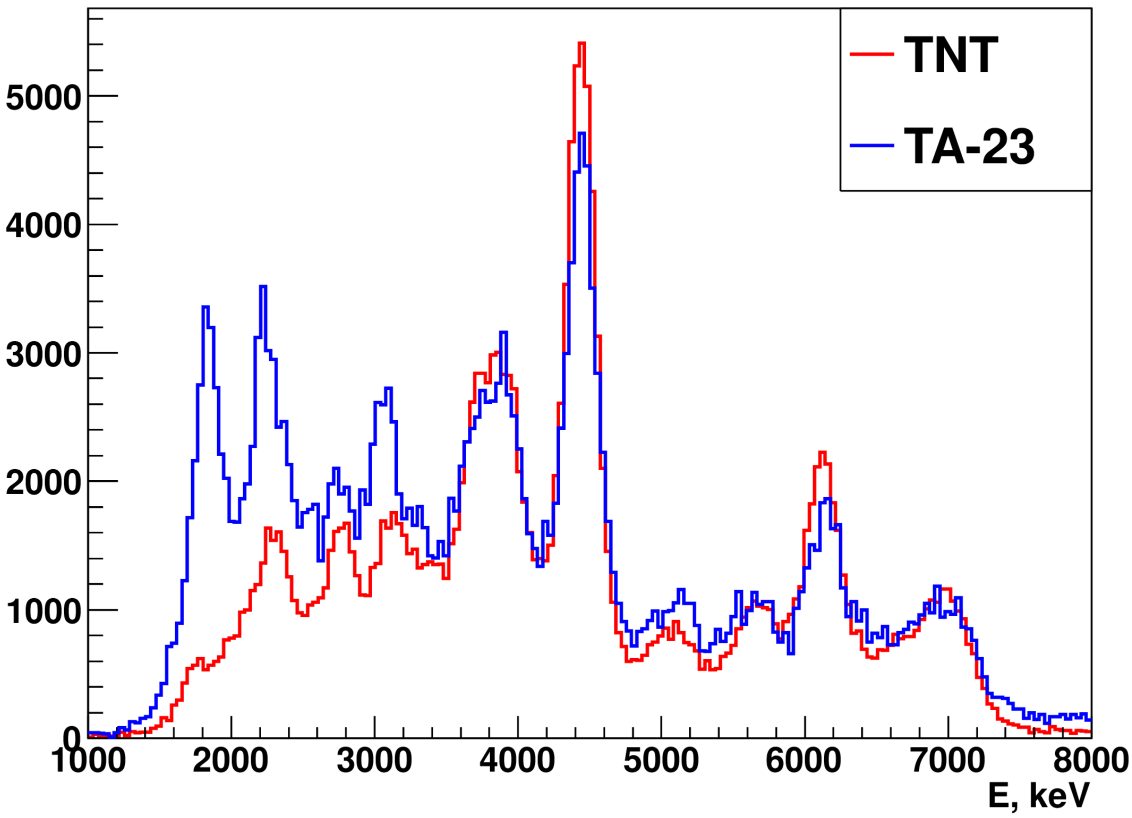


Рис. 7. Энергетический спектр гамма-квантов от ТНТ (красная линия) и ТА-23 (синяя линия).

В разработанной ППР для идентификации ВВ используются 9 областей сравнения спектров гамма-квантов.

Другой отличительной особенностью созданной стационарной установки является большая гранулярность зоны досмотра – зона досмотра делится на большое число элементарных объемов - вокселей, в которых производится элементный анализ. Общее число вокселей составляет 64х7=448.

Малый размер пикселя альфа-детектора и большое расстояние альфа-детектора до тритиевой мишени приводят к малому размеру отдельного меченого пучка. Это облегчает идентификацию малых масс вещества. Так 25 г ТНТ было обнаружено за 393 с, 50 г. ТНТ – за 250 с при интенсивности НГ I= 4 x$10^7$ $c^{-1}$.

Всего на стационарной установке было выполнено 64 измерения в 2011 г. и 83 в 2012 г. Измерения проводились для различных ВВ из Таблицы 1, а также для 10 различных бытовых веществ. Верное обнаружение ВВ произошло в 97% случаев. Процент ложных обнаружений, когда бытовое вещество принималось за ВВ составил 2% случаев.

Для идентификации ВВ была разработана итерационная процедура изменения критериев отбора в процессе измерений. Она состояла в том, что критерии отбора уточнялись с каждым измерением нового опасного вещества. Если на начальном этапе тестовых измерений вероятность правильной идентификации ВВ составляла 65%, то в настоящее время, по мере расширения накопленной базы данных и статистики набора зарегистрированных событий, вероятность правильной идентификация ВВ составляет 95%.

## 4. Выводы

Разработана и создана стационарная установка по обнаружению и идентификации взрывчатых веществ с использованием метода меченых нейтронов. Главное отличие настоящей установки от комплекса [10] состоит в увеличении числа меченых пучков, которыми облучается объект досмотра, с 9 до 64, а также в разработке новой программы обработки данных и принятия решений.

Повышенная гранулярность установки позволила проводить обнаружение в четыре раза меньших масс вещества, чем на комплексе [10].

Эксплуатация установки в течение двух лет проводилась в Межрегиональном центре по исследованию и обезвреживанию взрывных устройств ФСБ РФ. По результатам 147 измерений вероятность обнаружения составила 97%, вероятность идентификации 95%, при вероятности ложных тревог в 2%.

## Литература


1. P.O. Hawkins, R.W. Sutton, Rev. Sci. Instr. 31 (1960) 241.
2. L.I.Ussery et al., Los Alamos Nat. Lab report LA12847-MS (October 1994).
3. E.Rhodes et al., SPIE, v. 2092, p. 288 (1993); E.Rodes et al., IEEE Trans. Nucl. Science, 39 (1992) 1041-1045.
4. A.Beyerle, J.P.Hurley, L.Tunnell, Nucl.Instr.Meth. A299 (1990) 458.
5. S.Pesenti et al., Nucl. Instr. Meth., A531 (2004) 657.
6. V.M.Bystritsky et al., Proceedings of the 4th International Symposium on Technology and Mine Problem, Naval Postgraduate School, March 13-16, Monterey, California, 2000.
7. V.M.Bystritsky et al., Proceedings of the International Conference on Requirements and Technologies for the Detection, Removal and Neutralization of Landmines and UXO, EUDEM2-SCOT-2003, 15-18 September 2003, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belguim, 2003, v 1,2.
8. V.M.Bystritsky et al., Proc. Conference "Portable neutron generators and technologies on their basis", Moscow, 2004, p.283.
9. V.M.Bystritsky et al., JINR Communications, E13-2006-36, 2006.
10. V.M.Bystritsky et al., Physics of Particles and Nuclei Letters, 5 (2008) 441.