

# Исследование параметров установки для идентификации взрывчатых и наркотических веществ на основе портативного нейтронного генератора

Е.П.Боголюбов<sup>1</sup>, В.М.Быстрицкий<sup>2</sup>, Н.В.Власов<sup>2</sup>, В.Г. Кадышевский<sup>2</sup>, А.П.Кобзев<sup>2</sup>, В.А.Никитин<sup>2</sup>, Ю.К.Пресняков<sup>1</sup>, Ю.Н.Рогов<sup>2</sup>, В.И.Рыжков<sup>1</sup>, М.Г.Сапожников<sup>2</sup>, А.Н. Сисакян<sup>2</sup>, В.М.Слепнёв<sup>2</sup>, В.А.Уткин<sup>2</sup>, Т.О.Хасаев<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Всероссийский НИИ автоматики им. Н.Л. Духова, Москва.

<sup>2</sup> Объединённый Институт Ядерных Исследований, Дубна.

## 1. Введение

Создание эффективной методики идентификации взрывчатых и наркотических веществ, скрытых в контейнерах, ручной клади или грунте, является актуальной задачей. Существующая проблема инициировала разработку различных методик и аппаратуры, в том числе, и на основе ядерно-физических принципов /1/ с использованием потоков нейтронов. Преимущество нейтронной технологии для решения задачи поиска скрытых веществ заключается в большой глубине зондирования (до 1 м при плотности вещества  $\sim 1\text{г/см}^3$ ), высокой чувствительности к элементному составу объекта (определение относительной концентрации лёгких элементов (С, N, O..) с точностью 5 – 10 %), высокой скорости идентификации (несколько минут) и в реализации неразрушающего анализа исследуемого объекта. Прием экспериментальных данных, их обработка и принятие решения производятся в реальном времени. В литературе описано несколько разработок в данном направлении: метод тепловых нейтронов (ТНА) /2/, быстрых нейтронов (FNA) /3/, импульсного нейтронного анализа (PNA) /4/. Каждая методика обладает своими достоинствами и недостатками. Состояние проблемы рассмотрено на конференциях по данной тематике [3, 4, 5, 6].

Конечная цель исследований и разработок в этом направлении состоит в создании компактной установки для идентификации скрытого вещества. Ни одно из устройств, созданных до сих пор, не удовлетворяет требованиям практического решения поставленной задачи. Поэтому, необходим дальнейший поиск в этом направлении с целью достижения баланса стоимости, быстродействия, чувствительности и простоты обслуживания установки.

Среди большого количества разрабатываемых в настоящее время ядерно-физических подходов следует выделить идентификацию скрытого вещества методом меченых нейтронов (ММН). Данный метод кажется наиболее обещающим для восстановления трехмерного изображения объекта и для определения его элементного состава. Исследования ММН выполнены в Лос Аламосской Национальной лаборатории /7/, в Аргоннской Национальной Лаборатории /8/, в Специальной Технологической Лаборатории Невады /9/, в Калифорнийском Атомном Сотрудничестве /10/, в Объединённом Институте Ядерных Исследований (ОИЯИ), Дубна [5, 11], Радиовом Институте РАН (Санкт Петербург) /14/ и в других центрах /12/.

Наиболее простой и, пожалуй, единственный на сегодня способ обеспечить компактность, мобильность и простоту в управлении установкой, - это применение портативного нейтронного генератора со встроенным  $\alpha$  детектором.

В настоящей работе мы сообщаем первые результаты исследования характеристик созданной установки для идентификации скрытых веществ на основе портативного нейтронного генератора со встроенным 4-х канальным сцинтилляционным  $\alpha$  детектором. Результаты получены при облучении образца из  $^{12}\text{C}$  потоком меченых нейтронов. Настоящая работа выполнена в сотрудничестве ВНИИА и ОИЯИ.

## 2. Метод

В ММН используются быстрые монохроматические нейтроны с энергией 14.1 МэВ, образующиеся в реакции  $d + t \Rightarrow {}^4\text{He} + n$ . В данной бинарной реакции  $\alpha$  частицы (с энергией 3.5 МэВ) и нейтроны вылетают в противоположных направлениях. Локализация траектории  $\alpha$  частицы (в нашем случае – двух координатным  $\alpha$  спектрометром) полностью определяет направление вылета меченого нейтрона. Меченый нейтрон взаимодействует с веществом изучаемого объекта и в результате неупругого процесса  $A(n, n' \gamma)A^*$  образуются  $\gamma$  кванты с определённой энергией, характерной для каждого химического элемента. Регистрация и анализ энергетического спектра  $\gamma$  квантов позволяет, в принципе, определить элементный состав изучаемого объекта. Измеряя распределение временных интервалов между сигналами с  $\alpha$  и  $\gamma$  детекторов, можно извлечь информацию о координате взаимодействия нейтрона с ядрами вещества вдоль его траектории и восстановить трехмерное изображение объекта. Отбор событий по временному критерию  $\alpha$  -  $\gamma$  совпадений значительно снижает фон, обусловленный регистрацией  $\gamma$  детектором рассеянных нейтронов,  $\gamma$  квантов и наведённой радиоактивности.

Метод меченых нейтронов, в основном, основывается на идентификации элементов С, N и O. Атомарный состав облучаемого объекта определяется в каждой выделенной его области. В неупругом взаимодействии нейтронов с углеродом азотом и кислородом возбуждаются уровни компаун-ядер с последующей эмиссией  $\gamma$  квантов с характерными энергиями 4,43, 5,1 и 6,13 МэВ, соответственно. В принципе, другие элементы тоже могут быть идентифицированы, если  $\gamma$  детектор обладает достаточно высоким энергетическим разрешением. Более подробное описание методики с её модификациями можно найти в работах /5, 8 – 12, 14/.

Установка, действующая на основе ММН, может также быть использована для нейтронного каротажа нефтяных скважин, оперативного неразрушающего дистанционного химического анализа сложных веществ в ряде производственных процессов, в том числе в условиях высокого фона нейтронов и гамма квантов.

## 2. Нейтронный генератор

На рис. 1 приведена фотография созданного портативного генератора. В его состав входят следующие основные узлы:

- а) Корпус.
- б) Ионный источник, работающий в режиме Пеннинга.
- в) Титановая мишень, насыщенная тритием.
- г) 4-х секционная матрица сцинтилляторов.
- д) Источник газообразного дейтерия и трития.
- е) Ускоряющие и фокусирующие электроды.

Ускоренный пучок дейтронов и тритонов падает на мишень, предварительно насыщенную дейтерием и тритием. В результате протекания  $dt$  реакции образуются монохроматиче-

ские нейтроны с энергией 14,1 МэВ. Мишень электрически изолирована от земли и находится под потенциалом –110 кВ. Ток пучка ионов, падающих на мишень, составляет 20-50 мкА. Для подавления фоновой загрузки  $\alpha$  детектора, обусловленной процессом ускорения электронов, вылетающих из мишени под действием пучка дейтронов и тритонов, мишень окружена охранным электродом, находящимся под потенциалом -111,8 кВ.

Матрица  $\alpha$  детектора состоит из четырех сцинтилляторов с размером  $10 \times 10 \times 0,5$  мм<sup>3</sup>. Расстояние от центра мишени до сцинтилляторов составляет 70 мм. Сцинтилляторы выполнены из неорганических кристаллов алюмината иттрия, активированных церием YAlO<sub>3</sub> (YAP(Ce)), которые имеют следующие характеристики:

- высокое энергетическое разрешение при регистрации  $\alpha$  частиц;
- малую чувствительность к фону нейтронов и  $\gamma$  квантов;
- высокую радиационную стойкость;
- малое время высвечивания (30 нс);
- термостойкость в интервале температур 0-500 °С.

Более подробное описание свойств сцинтиллятора YAP (Ce) приведено в работе /16/.

Кристаллы  $\alpha$ -детектора имеют оптическую связь с фотоумножителями (ФЭУ), расположенными вне корпуса генератора. Связь с ФЭУ реализуется с помощью окон в вакуумной кожухе генератора, выполненных из стекла марки С-52, позволяющего осуществить вакуумно-плотную сварку окон с коваром, обеспечив при этом оптическую прозрачность, требуемую для достижения максимальной чувствительности ФЭУ.

Интенсивность нейтронного потока варьируется путем изменения тока ионного источника, а также величины ускоряющегося напряжения на электродах нейтронного генератора.

### 3. Экспериментальная установка

Схематический чертеж экспериментальной установки приведен на рис. 2. Она состоит из:

1. нейтронного генератора;
2. детектора  $\gamma$ -излучения на основе кристалла NaI (Tl) ( $\varnothing$  150 мм, d=100 мм);
3. регистрирующей электроники и системы сбора и передачи данных в ПК (на рис. не показаны).

Комплектация настоящей экспериментальной установки, в принципе, ничем не отличается от комплектации установки, описанной нами в работе /5/. Единственное различие между ними заключается в источнике нейтронов: в одном случае – портативный нейтронный генератор, а в другом – электростатический ускоритель Ван де Граафа.

### 4. Результаты

Основные параметры установки получены при облучении образца углерода потоком нейтронов интенсивностью  $\sim 10^7$  н/с в телесном угле 4 п. Образец из <sup>12</sup>C с размерами 120×120×100 мм установлен на расстоянии 700 мм от мишени. Сечение пучка нейтронов, меченого одним из сцинтилляторов  $\alpha$  детектора, составляет на указанном расстоянии от мишени 100×100 мм.

На рис. 3 приведено распределение временных интервалов между моментами регистрации  $\alpha$  частицы и  $\gamma$  кванта с энергией 4,43 МэВ, возникающего в реакции <sup>12</sup>C(n,  $\gamma$ )<sup>12</sup>C. Временное разрешение установки составляет  $\Gamma = (3,39 \pm 0,07)$  нс, что совпадает с соответствующей величиной, полученной нами в опытах на ускорителе Ван де Граафа. Отметим низкий уровень фона случайных совпадений: отношение сигнал/фон составляет S/B= 20.

На рис. 4а и 4б приведены энергетические распределения событий, зарегистрированных  $\gamma$  детектором без совпадений и в совпадениях с сигналом от  $\alpha$  детектора. Как видно из рис.4а, площадь спектра, соответствующая регистрации характеристической линии углерода  $E_\gamma = 4,43$  МэВ и линии утечки аннигиляционного  $\gamma$  кванта с энергией 0,511 МэВ ( $E_\gamma = 3,92$  МэВ), существенно меньше уровня фона:  $K_1 = S_1/B_1 = 0,044$ . В спектре же 4б данное соотношение равно:  $K_2 = S_2/B_2 = 20$ . Таким образом, фактор подавления фона при использовании  $\alpha$ - $\gamma$  совпадений составляет  $K_2/K_1 \approx 450$ .

Энергетическое разрешение спектрометрической системы регистрации  $\gamma$  квантов на линии с энергией  $E_\gamma = 4,43$  МэВ совпадает с соответствующей величиной, полученной в опытах на ускорителе Ван де Граф, и составляет  $\Delta E_\gamma / E_\gamma = (4,1 \pm 0,3) \%$ .

Анализа полученных результатов приводит к следующим выводам.

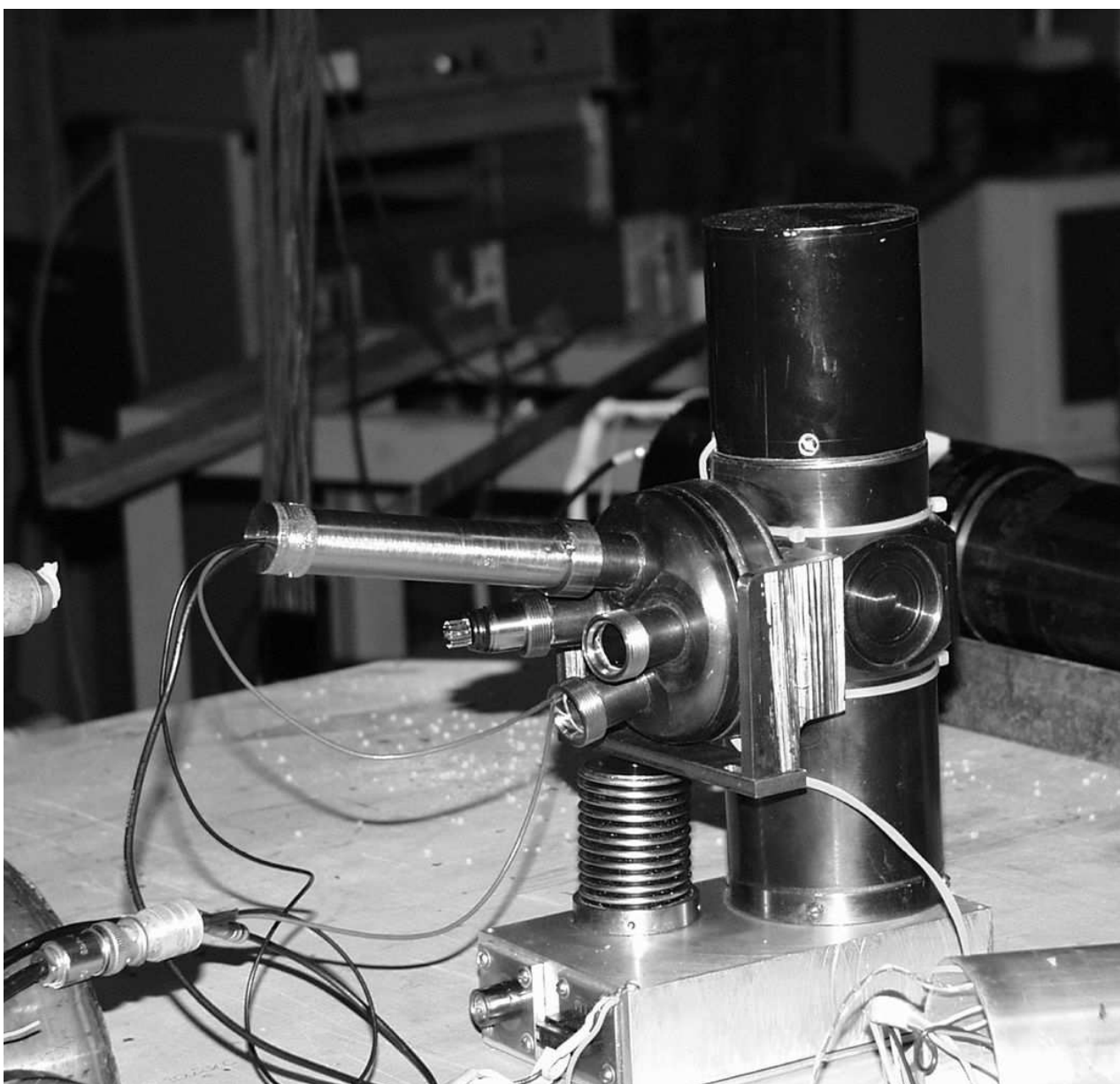
1. Созданная установка с нейтронным генератором со встроенным  $\alpha$  детектором на основе неорганического сцинтиллятора YAP (Ce) может быть применена для идентификации скрытых веществ в практике таможенного контроля, поиска мин и в ряде технологических процессов. При этом, максимальная интенсивность нейтронного потока в телесном угле  $4\pi$  составляет  $\sim 10^7$  /с. Ограничение интенсивности нейтронов обусловлено необходимостью разделения сигналов с  $\alpha$  детектора, соответствующих  $\alpha$  частицам dt реакции и его фоновой загрузке.
2. Важной задачей является разработка конструкции генератора с использованием мишени, находящейся под потенциалом земли. При этом, существенно уменьшится фоновая загрузка  $\alpha$ -детектора, что позволит работать при увеличенной интенсивности потока нейтронов.
3. Окончательный выбор конструкции нейтронного генератора должен определяться условиями его использования.

#### Литература.

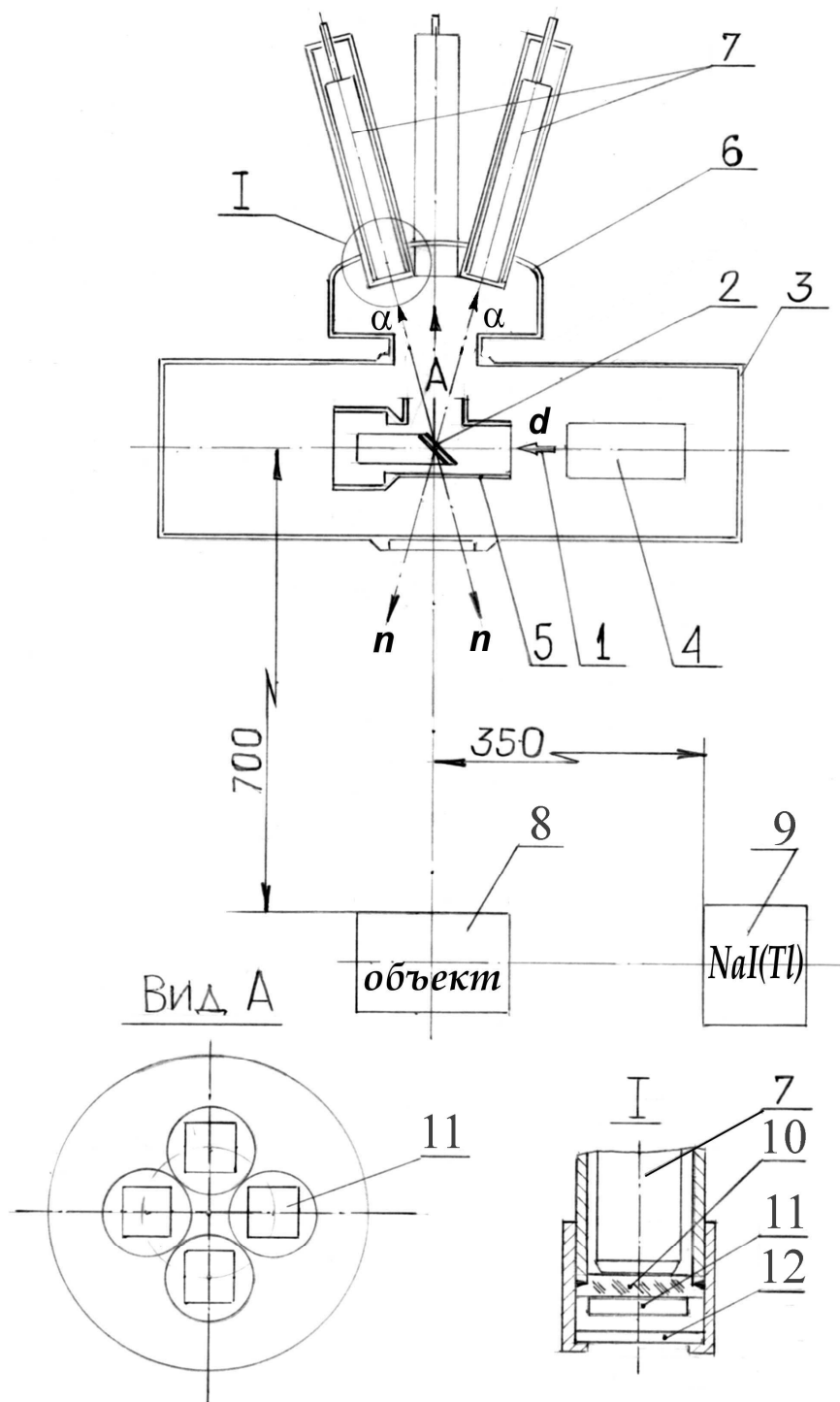
1. T.Gozani et al. Proc. of Int. Sympos. on Explosive Detection Techn. S.M.Khan edit. FAA Technical Center, Atlanta City, p. 27, Feb. 1992.
2. P.M.Shea et al. Nucl. Instr. and Meth., A299, p. 444, (1990).
3. J.C.Overley et. al. SPIE Proc. 2867, 219, (1997).
4. G.Vourvopoulos et al. Report of the First Reseach Co-ordination Meeting, Rudjer Boskovie Inst. in Zagreb, Croatia, Nov. 1999,
5. V.M.Bystritski et al. Forth International Symposium on Technology an the Mine Problem, Pillar V. Naval Postgraduate School, Monterey, California.
6. Nuclear Physics Methods for Detecting Smuggled Explosives and Nuclear Materials, April 8-11, 1996, Obninsk, Russia.
7. L.I.Ussery et al. Los Alamos Nat. Lab report LA12847-MS (October 1994).
8. E.Rhodes at al., SPIE, v. 2092, p. 288 (1993)  
E.Rodes et al., APSTING: Associated Particle Sealed Tube Neutron Generator Studies for Arms Control. ANL report ANL/ACTV-95/1 (1994)
9. J.P.Hurley et al. Current Status of the Associated Particle Imaging System at STL.EGG10617-3008 (January 1992).
10. B.C.Maglich et al., Atometry. Hienergy Report, Hien 98-111, Sept. (1998).  
B.C.Maglich et al., Bull. American Phys. Soc. Nucl. Phys. Div. Meting, Asilomar, Oct. 1999.
11. В.М. Быстрицкий и др. Межотраслевая научно-техническая конференция "Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе", Всероссийский НИИ автоматики, Москва 26-30 мая 2003 г.
12. G.Vesti et al., Nucl.Instr.Meth., A422 (1999) 918.

G.Vesti et al., preprint DFPD 9/NP/43.

13. Е.П. Боголюбов и др. Межотраслевая научно-техническая конференция "Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе", Всероссийский НИИ автоматики, Москва 26-30 мая 2003 г.
14. А.В. Кузнецов (НПО Радиевый институт им. В.Г.Хлопина) Использование портативных генераторов нейтронов со встроенным детектором сопутствующих частиц для обнаружения опасных веществ
15. Е.П. Боголюбов, В.М. Быстрицкий и др. Межотраслевая научно-техническая конференция "Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе", Всероссийский НИИ автоматики, Москва 26-30 мая 2003 г.
16. В.В. Авдейчиков и др. Межотраслевая научно-техническая конференция "Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе", Всероссийский НИИ автоматики, Москва 26-30 мая 2003 г.



**Рис. 1.** Нейтронный генератор со встроенным 4-х-канальным  $\alpha$  детектором.



**Рис. 2.** Схема установки с нейтронным генератором.

1. Пучок дейтронов.
  2. Мишень.
  3. Корпус генератора.
  4. Источник ионов.
  5. Охранный электрод.
  6. 4-канальный  $\alpha$  детектор.
  7. ФЭУ.
  8. Исследуемый объект (углерод).
  9. Детектор  $\gamma$  квантов NaI(Tl).
  10. Стеклое окно.
  11. Сцинтиллятор  $\alpha$  детектора, YAP.
  12. Плёнка Al, 3 мкм.
- $\alpha$  -- Траектории  $\alpha$  частиц.  
 n – Пучки меченых нейтронов.

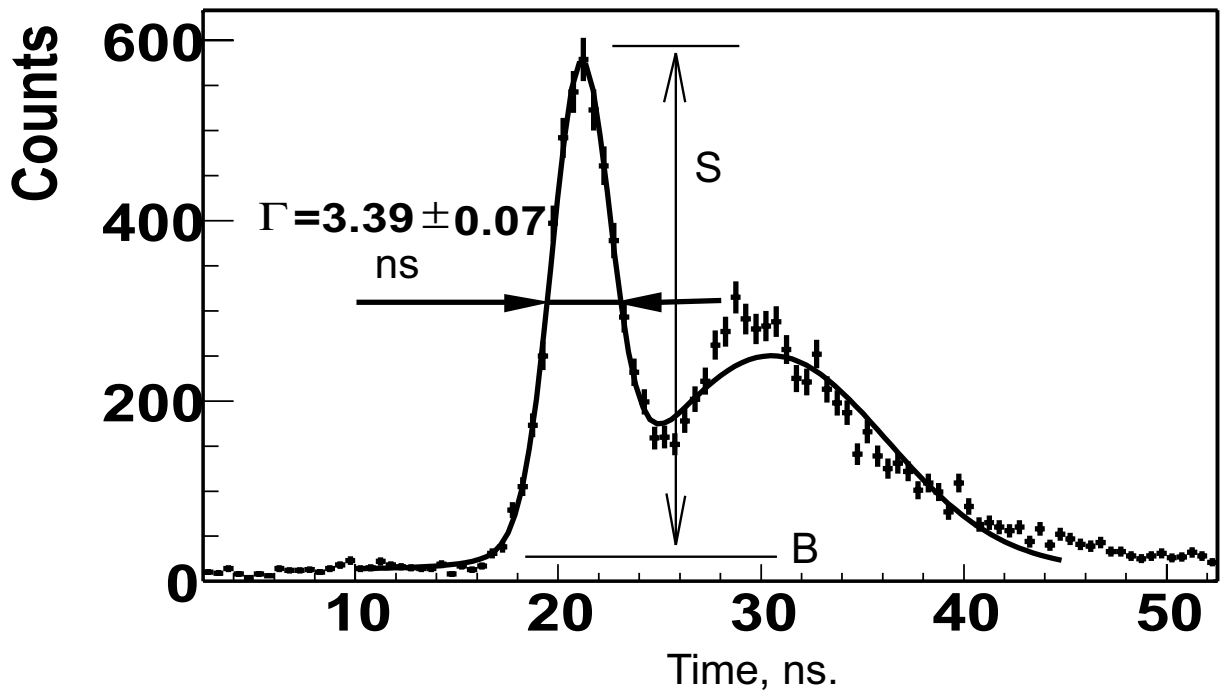


Рис.3 Распределение временных интервалов между сигналами с  $\alpha$  и  $\gamma$  детекторов.

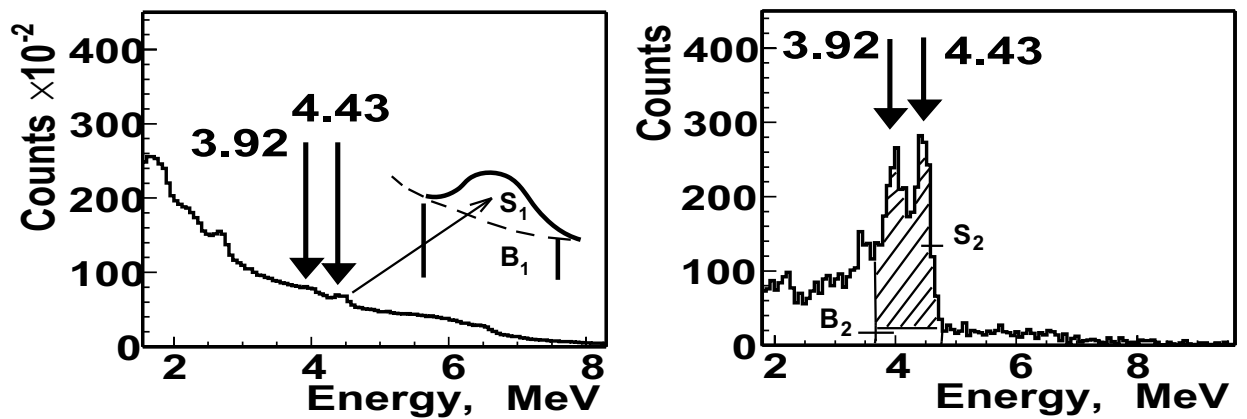


Рис. 4. Энергетический спектр характеристического  $\gamma$  излучения углеродного образца, измеренный с помощью  $\gamma$  детектора NaI(Tl) без совпадений (слева) и с совпадениями (справа) с сигналами  $\alpha$  детектора.