

УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ γ -КВАНТОВ С ЭНЕРГИЕЙ 4,43 МэВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ НЕУПРУГОМ РАССЕЯНИИ НЕЙТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 14,1 МэВ НА ЯДРАХ ^{12}C

*В. М. Быстрицкий^а, Д. Н. Грозданов^{а,б}, А. О. Зонтиков^а, Ю. Н. Конач^а,
Ю. Н. Рогов^а, И. Н. Русков^{а,б}, А. Б. Садовский^а, В. Р. Ской^{а,1},
Ю. Н. Бармаков^в, Е. П. Боголюбов^в, В. И. Рыжков^в, Д. И. Юрков^в*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Институт ядерных исследований и ядерной энергетики, София

^в Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова, Москва

Работа посвящена измерению углового распределения γ -квантов с энергией 4,43 МэВ, образующихся при неупругом рассеянии нейтронов с энергией 14,1 МэВ на ядрах ^{12}C . В качестве источника меченых нейтронов использовался портативный нейтронный генератор ИНГ-27 (разработанный и выпускаемый во ВНИИА (Москва)) со встроенным 64-пиксельным кремниевым α -детектором. Регистрация γ -квантов характеристического ядерного излучения ^{12}C осуществлялась с помощью спектрометрической системы, состоящей из 22 γ -детекторов на основе кристаллов NaI(Tl), расположенных вокруг мишени. Приводится анализ результата измерения углового распределения γ -квантов с энергией 4,43 МэВ и его сравнение с результатами других экспериментальных работ, имеющихся в списке литературы.

The article is focused on the angle distribution measurement of 4.43-MeV gamma rays which are generated in inelastic scattering of 14.1-MeV neutrons on ^{12}C . A portable neutron generator ING-27 (developed and produced at VNIIA in Moscow) with a built-in 64-pixel silicon alpha detector was used as a source of tagged neutrons. Detection of intrinsic gamma rays of ^{12}C was performed with a spectrometry system utilizing 22 NaI(Tl) detectors which were placed around the carbon target. Analysis of the result and comparison with other referent experimental works on angle distribution measurement of 4.43-MeV gamma rays are provided.

PACS: 25.40.Fq; 28.20.Np; 07.85.Nc; 29.30.Kv

ВВЕДЕНИЕ

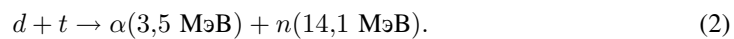
Одним из первых экспериментов, намеченных нами в рамках выполнения проекта TANGRA (TAGged Neutrons and Gamma RAys) [1–4], является измерение угловых корреляций γ -квантов и нейтронов, образующихся в реакции неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14,1 МэВ на ядрах углерода:



¹E-mail: skoy@nf.jinr.ru

Результат данного эксперимента позволит не только произвести корректное сравнение с экспериментальными данными, полученными ранее в опытах [5–14] по исследованию характеристик реакции (1) и существенно различающимися между собой, но и получить информацию о механизме процесса неупругого рассеяния быстрых нейтронов на ядрах углерода. Следует отметить, что в рамках проекта TANGRA предполагается с точки зрения аспектов ядерной физики и ядерной астрофизики осуществить целый цикл экспериментов, посвященных детальному изучению реакций неупругого рассеяния быстрых нейтронов на ядрах ^{12}C , ^{14}N , ^{16}O , ^{27}Al , ^{56}Fe , ^{37}Cl , ^{32}P и др. с использованием метода меченых нейтронов (ММН). Кроме этого, интерес к изучению данных реакций продиктован также необходимостью решения многих прикладных задач, базирующихся на использовании ММН и связанных с минералогией и геологией Земли, с определением элементного состава горных пород [15–21], а также с созданием алгоритмов и приборов для обнаружения скрытых опасных веществ (взрывчатых, наркотических и сильнодействующих отравляющих веществ) [22–30].

Суть метода меченых нейтронов заключается в следующем. В качестве источника нейтронов в этом случае используется бинарная реакция:



Метод меченых нейтронов [22–30] основан на регистрации α -частицы, образующейся в реакции (2) и имеющей практически противоположное направление к направлению вылета нейтрона в совпадениях с характеристическим ядерным γ -излучением, возникающим в результате неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14,1 МэВ на ядрах веществ облучаемого образца, — реакции типа



Знание числа нейтронов, падающих на облучаемый образец-мишень (путем регистрации α -частиц, сопутствующих образованию нейтронов в реакции (2)), числа $(n-\gamma)$ -совпадений, размеров мишени, а также эффективности регистрации γ -квантов характеристического ядерного излучения позволяет корректно определить дифференциальные сечения процессов неупругого рассеяния нейтронов на ядрах исследуемых элементов с возбуждением определенных уровней (переход их в основное состояние происходит путем последующего испускания γ -квантов соответствующей энергии):

$$\frac{d\sigma(n, n'\gamma)}{d\Omega_n}, \quad \frac{d\sigma(n, n'\gamma)}{d\Omega_\gamma}, \quad \frac{d^2\sigma(n, n'\gamma)}{d\Omega_n d\Omega_\gamma}, \quad (4)$$

где Ω_n и Ω_γ — телесные углы детекторов для регистрации нейтронов и γ -квантов соответственно.

Как следует из сказанного, важным преимуществом ММН является возможность мониторингирования потоков меченых нейтронов с практически 100 %-й эффективностью. Более того, за счет введения $(\alpha-\gamma)$ -, $(\alpha-n')$ -, $(\alpha-n'\gamma)$ -совпадений уровень фона понижается более чем в 200 раз. Эти свойства ММН позволяют использовать его для прецизионного исследования ядерных процессов типа $(n, n'\gamma)$ и $(n, 2n)$, которые крайне важны не только в плане ядерной физики и ядерной астрофизики, но и в плане более детального описания цепочек размножения нейтронов, наработки энергии и утилизации ядерных отходов.

Измерение угловых корреляций ($n-\gamma$) в неупругом рассеянии нейтронов на четно-нечетных ядрах целого ряда легких и средних по массе элементов (${}^6\text{Li}$, ${}^{10}\text{B}$, ${}^{38}\text{K}$, ${}^{40}\text{Ca}$, ${}^{26}\text{Al}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{14}\text{N}$, ${}^{16}\text{O}$), включая их возбужденные состояния, позволяет получить важную информацию о механизмах протекания указанных выше реакций. Информация о процессах такого типа крайне бедна по сравнению с имеющейся в результате изучения неупругих процессов рассеяния заряженных частиц на ядрах.

В связи со сказанным для определения характеристик процесса неупругого рассеяния нейтронов на сложных ядрах с требуемой точностью нами предложена постановка экспериментов с использованием метода меченых нейтронов.

Детальное исследование реакции (1) как первого шага реализации намеченной физической программы экспериментального изучения реакций неупругого рассеяния нейтронов на ядрах средних по массе элементов продиктовано еще и тем, что нами в настоящее время активно разрабатывается алгоритм обнаружения алмазов (углерода) в кимберлитовой руде, а также определения элементного состава горных пород с помощью ММН. Результаты тестовых опытов, выполненных к настоящему времени, однозначно свидетельствуют о перспективности использования ММН в алмазодобывающей промышленности [21, 31].

Ниже приводится описание эксперимента по измерению углового распределения γ -квантов с энергией 4,43 МэВ, образующихся в реакции неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14,1 МэВ на ядрах углерода.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

1.1. Источник нейтронов. α - и γ -детекторы. На рис. 1, *а* приведена схема экспериментальной установки, а на рис. 1, *б* — ее общий вид.

В качестве источника нейтронов с энергией 14,1 МэВ нами использовался портативный нейтронный генератор ИНГ-27 [32, 33], разработанный и изготавливаемый Всероссийским институтом автоматики им. Н. Л. Духова (ВНИИА). Для формирования потока меченых нейтронов внутри генератора расположен кремниевый двусторонний стриповый детектор [26], содержащий по восемь взаимно перпендикулярных стрипов на каждой его стороне, которые образуют матрицу 8×8 с размером каждого элемента (пикселя) 4×4 мм. Полный размер чувствительной области 64-элементного α -детектора составляет 32×32 мм. α -детектор расположен на расстоянии 62 мм от тритиевой мишени нейтронного генератора (НГ) и предназначен для регистрации α -частиц с энергией 3,5 МэВ, образующихся в реакции (2).

Сигналы с восьми горизонтальных и восьми вертикальных стрипов α -детектора поступают на входы соответствующих предусилителей с помощью 16-контактного разъема. Пространственные характеристики 64 меченых пучков нейтронов измерялись с помощью стрипового сцинтиляционного детектора (профилометра) с размерами каждого стрипа $150 \times 7,5 \times 5$ мм [26]. На рис. 2, в качестве примера, приведено распределение нейтронов центрального меченого пучка вдоль оси X в плоскости XZ , перпендикулярной направлению меченого пучка нейтронов, полученное при условии совпадения сигналов из каждого Z -вертикального стрипа с сигналом одного и того же горизонтального X -стрипа α -детектора.

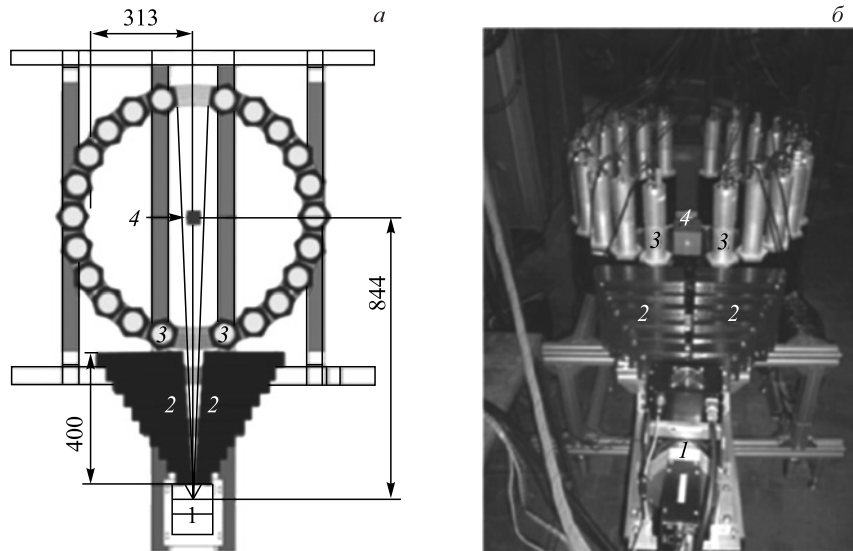


Рис. 1. Схема (а) и внешний вид (б) экспериментальной установки. 1 — источник нейтронов ИНГ-27; 2 — железный защитный коллиматор нейтронов и γ -лучей; 3 — NaI(Tl) сцинтилляционные детекторы γ -лучей и нейтронов; 4 — исследуемый образец из углерода (^{12}C). Основные размеры на схеме указаны в миллиметрах

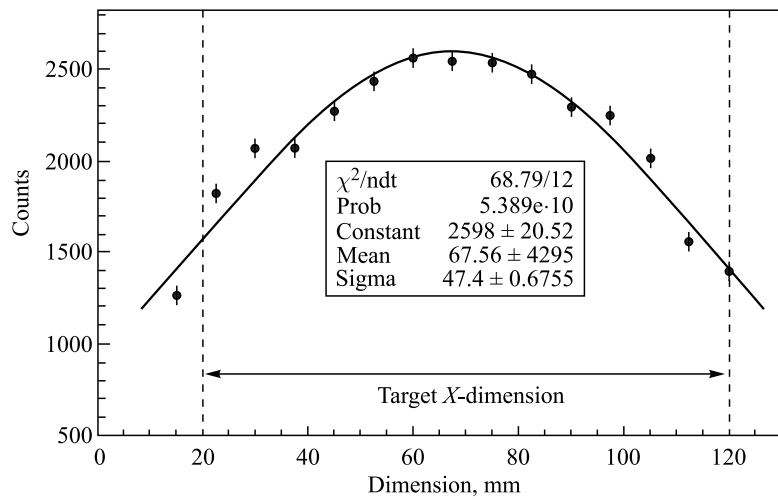


Рис. 2. Распределение нейтронов центрального меченого пучка вдоль оси X в плоскости XZ

В качестве детекторов характеристического ядерного γ -излучения углерода с энергией 4,43 МэВ использовались 22 детектора γ -квантов на основе кристаллов NaI(Tl), выполненных в виде шестигранников: расстояние между гранями кристалла — 85 мм, высота кристалла — 200 мм. Детекторы γ -квантов располагались перпендикулярно к го-

горизонтальной плоскости по окружности радиусом 370 мм, в центре которой находилась углеродная мишень. Угол между осями двух соседних кристаллов NaI(Tl) в горизонтальной плоскости составлял 15° .

1.2. Регистрирующая электроника. Регистрирующая электроника представляет собой 32-канальный оцифровщик, конструктивно выполненный в виде двух плат размером стандартной PCI-карты, с возможностью установки в PCI-слот персонального компьютера и работы под его управлением с использованием для обмена информацией PCI-шины [4]. В основу системы регистрации сигналов с α - и γ -детекторов положен принцип оцифровки формы импульсов с последующим вычислением их временных и амплитудных характеристик. Пакет программ, поддерживающих работу регистрирующей электроники, включает в себя драйверы для PCI-интерфейса, программу селекции событий и их обработку, программу формирования файла данных, а также программы, необходимые для настройки режимов блока электроники. Все программное обеспечение, поддерживающее работу блока электроники, работает под управлением операционной системы на ядре Linux.

1.3. Калибровка γ -детекторов. До начала данных экспериментов был выполнен целый ряд дополнительных опытов, посвященных измерению: зависимостей энергетического разрешения γ -детекторов от энергии регистрируемых γ -квантов; эффективностей регистрации γ -квантов с использованием стандартных калибровочных источников γ -квантов ^{137}Cs , ^{60}Co и Pu-Be при наличии определенных амплитудных порогов регистрирующей аппаратуры; коэффициентов калибровки шкалы «амплитуда–энергия» каждого из 22 спектрометрических каналов регистрации γ -квантов; временного разрешения системы (α - γ)-совпадений в совпадениях с сигналом с центрального пикселя α -детектора.

Проверка линейности откликов γ -детекторов, а также измерение их энергетического разрешения определялось по линиям γ -квантов изотопов стандартного набора образцовых спектрометрических источников γ -излучения ОСГИ и непосредственно по энергетическим спектрам γ -квантов, образующихся при облучении быстрыми нейтронами образцов из чистого углерода, кислорода и азота. На основании данных измерений зависимость амплитуда–энергия носит линейный характер, а зависимость энергетического разрешения γ -детектора от энергии γ -квантов, как и следовало ожидать, достаточно хорошо описывается аппроксимирующей функцией вида $\sim \sqrt{E}$. В среднем энергетическое разрешение для всех использованных в эксперименте γ -детекторов было на уровне 8,5 % на линии ^{137}Cs .

1.4. Мишень. В эксперименте по измерению углового распределения γ -квантов, образующихся в реакции неупругого рассеяния нейтронов на ядрах углерода, использовалась мишень из чистого углерода в виде параллелепипеда с размерами $10 \times 10 \times 5$ см (толщина мишени по пучку меченых нейтронов составляла 5 см). Для выбора оптимальных размеров мишени в плане получения наилучшего углового разрешения и скорости счета для каждого из 22 γ -детекторов, установленных под различными полярными углами по отношению к первоначальному направлению нейтронов, нами было выполнено моделирование условий эксперимента по исследованию реакции (1) для углеродных мишеней с размерами 5×5 см и 10×10 см с вариацией по толщине мишени от 1 до 10 см.

Расчеты с таким набором различных размеров углеродной мишени были продиктованы необходимостью оценки влияния геометрических факторов размеров мишени на угловое распределение вылетающих γ -квантов. На рис. 3 для γ -детектора, установлен-

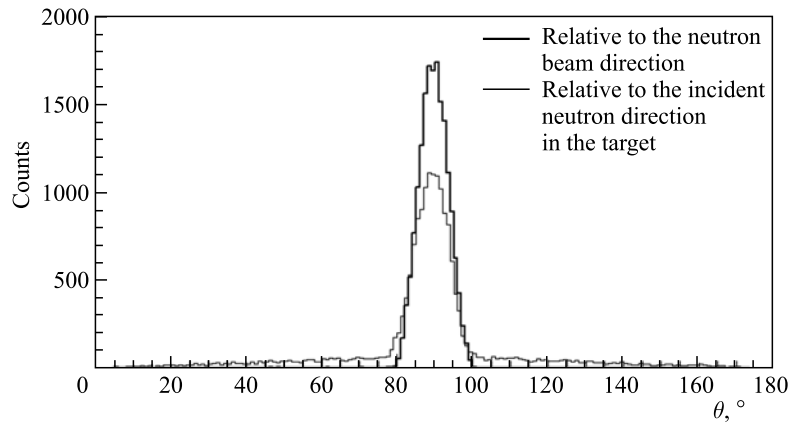


Рис. 3. Распределения γ -квантов с энергией 4,43 МэВ, образовавшихся в реакции (1) и зарегистрированных γ -детектором, установленным под углом 90° , по углу относительно оси пучка меченых нейтронов, падающих на мишень (верхняя кривая), и направления нейтрона, инициирующего протекание изучаемой реакции в веществе мишени (нижняя кривая)

ного под полярным углом 90° относительно оси центрального меченого пучка нейтронов, приведены расчетные распределения γ -квантов, образовавшихся в реакции (1) и зарегистрированных данным детектором, по углу вылета относительно оси пучка меченых нейтронов, падающих на мишень и инициирующих протекание данной реакции, и относительно направления нейтрона, в том числе, возможно, испытавшего многократное рассеяние в веществе мишени с последующим инициированием протекания изучаемой реакции. В среднем угловое разрешение детекторов по полярному углу в указанной конфигурации (см. рис. 1) описывается распределением Гаусса со среднеквадратичным отклонением $\sigma \approx 4,4^\circ$.

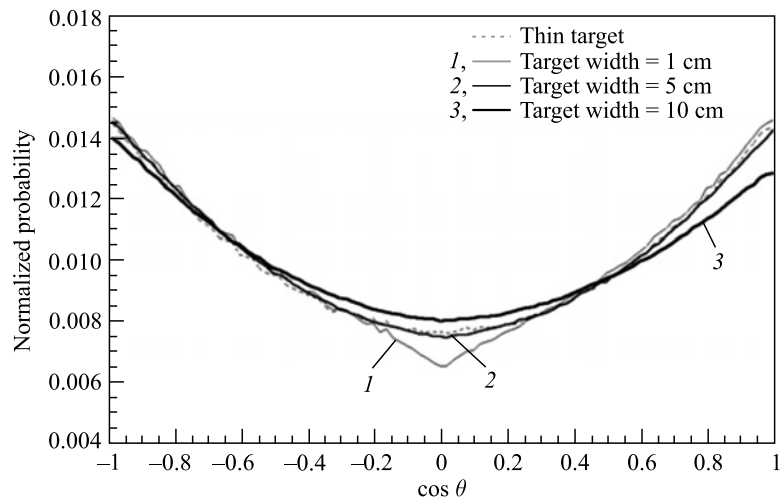


Рис. 4. Модельные угловые распределения γ -квантов характеристического излучения углерода с энергией 4,43 МэВ для мишеней разной толщины

На рис. 4 приведены расчетные угловые распределения γ -квантов характеристического излучения углерода с энергией 4,43 МэВ, испущенных из мишеней с линейными размерами в плоскости, перпендикулярной направлению центрального меченого пучка нейтронов, 10×10 см и толщинами 1, 5 и 10 см. Для сравнения дана кривая для бесконечно тонкой мишени.

Распределения, приведенные на рис. 3 и 4, получены в результате моделирования методом Монте-Карло при помощи пакета Geant4 [34]. При моделировании использовались угловые распределения γ -квантов из библиотеки ENDF/B-VII.1.

Перед началом набора статистики с углеродной мишенью была произведена юстировка центрального меченого пучка нейтронов относительного центра мишени. С учетом того, что в дальнейших экспериментах по программе TANGRA планируется исследование процессов неупругого рассеяния нейтронов на ядрах широкого класса химических элементов путем регистрации γ -квантов характеристического излучения и неупруго рассеянных нейтронов (n'), образующихся в реакциях (3), с использованием трех типов детекторов со сцинтилляторами NaI(Tl), NE-213 и BGO, нами был произведен выбор оптимальной пассивной защиты данных детекторов при ее разумных размерах, характеризующейся наибольшим коэффициентом подавления их фоновой загрузки за счет прямого попадания в них нейтронов, испущенных ИНГ-27 [3].

2. АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ спектров зарегистрированных γ -квантов характеристического ядерного излучения углерода с энергией 4,43 МэВ базировался на статистике, полученной в совпадениях с сигналом от центрального пикселя α -детектора при использовании мишени из чистого углерода с размерами $10 \times 10 \times 5$ см.

На рис. 5, *a–в* в качестве примера приведены энергетические распределения событий, зарегистрированных γ -детекторами в совпадениях с сигналом от α -детектора. Данное распределение получено при облучении углеродной мишени с размерами $10 \times 10 \times 5$ см потоком меченых нейтронов с энергией 14,1 МэВ.

Как видно из рис. 5, *a–в*, соотношение эффект/фон для γ -детекторов, установленных в передней и задней полусфере относительно направления пучка меченых нейтронов, падающих на мишень, различно. Данное различие объясняется пространственным распределением точек взаимодействия нейтронов и образовавшихся γ -квантов в результате реакции (1) с веществом мишени.

На рис. 6, *a–в* в качестве примера приведено временное распределение событий, зарегистрированных γ -детекторами в совпадениях с сигналом от центрального пикселя α -детектора. По оси абсцисс отложен временной интервал между моментами регистрации α -частицы, образующейся в бинарной реакции (2), и γ -кванта, образующегося в реакции (1).

Как видно из рис. 6, *a–в*, в данном временном распределении наблюдается три пика: *a*, *b* и *c*. Пик *b* обусловлен регистрацией характеристического γ -излучения углерода; пик *c* — регистрацией нейтронов, рассеянных на углеродной мишени с последующим попаданием их в γ -детекторы, а пик *a* — регистрацией γ -излучения, возникающего в результате взаимодействия меченых нейтронов пучка с веществом коллиматора (см. рис. 1, 2).

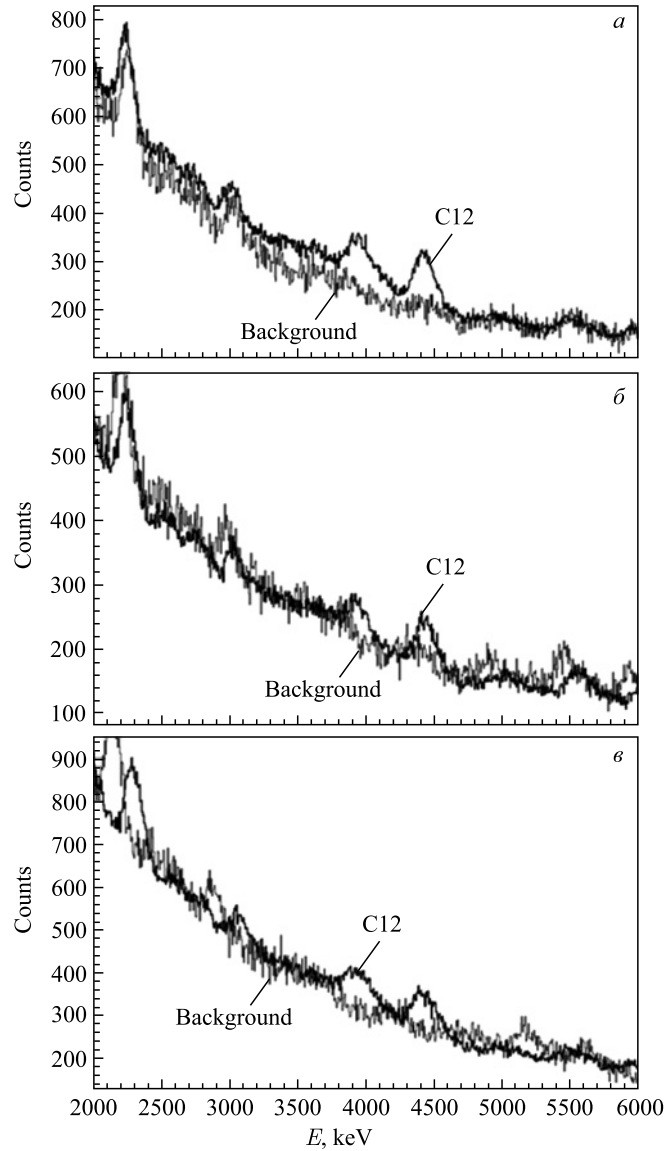


Рис. 5. Энергетическое распределение событий, зарегистрированных γ -детектором, расположенным под углом 30° (а), 90° (б) и 150° (в)

Для подавления уровня фона нами для дальнейшего анализа отбирались события, зарегистрированные каждым из 22 γ -детекторов в совпадении с сигналом от центрального пикселя α -детектора и лежащие в определенном временном интервале, равном по длительности одному и тому же числу стандартных отклонений для каждой из $(\alpha-\gamma)$ -систем:

$$\bar{T}_i - K\sigma_t^{(i)} \leq \bar{T}_i \leq \bar{T} + K\sigma_t^{(i)}, \quad \bar{T}_i = T_\alpha^{(i)} - T_\gamma^{(i)}, \quad (\Delta T)_i = 2K\sigma_t^{(i)}, \quad (5)$$

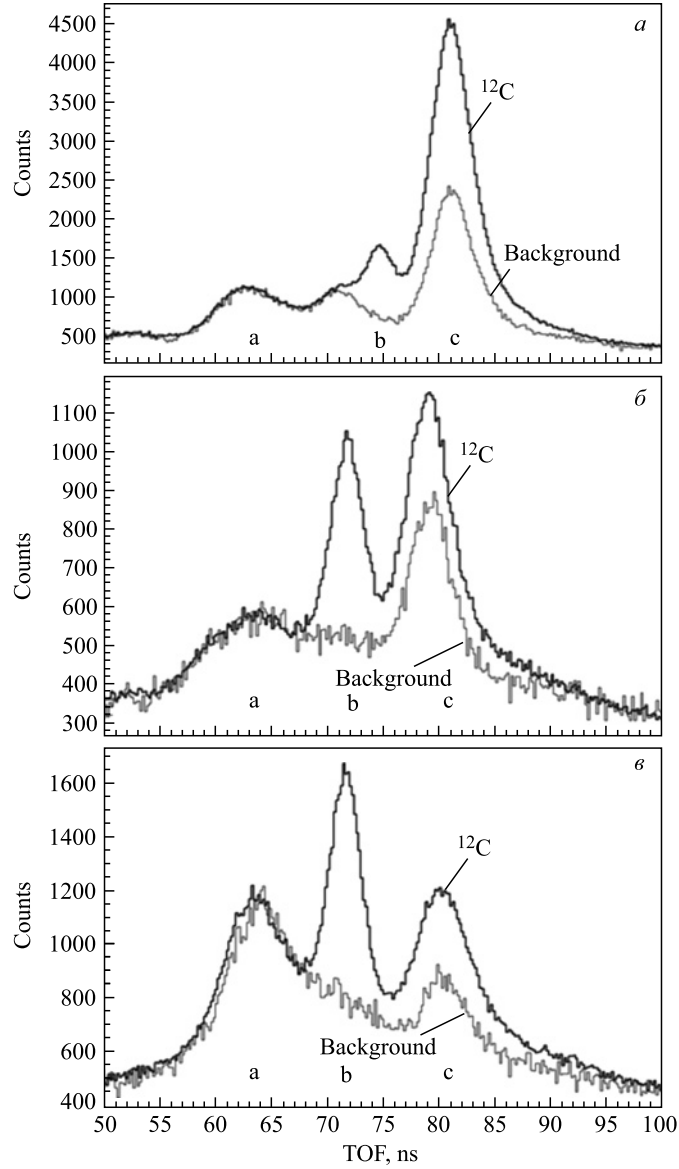


Рис. 6. Временное распределение событий, зарегистрированных γ -детектором, расположенным под углом 30° (а), 90° (б) и 150° (в)

где \bar{T}_i — среднее значение длительности интервала между моментами регистрации α -частицы и γ -кванта, образующегося в реакции $^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}^* \xrightarrow{\gamma} ^{12}\text{C}$ с энергией 4,43 МэВ, детектором с номером i ; $T_\alpha^{(i)}$, $T_\gamma^{(i)}$ — времена появления сигналов с α - и γ -детектора i ; $\sigma_t^{(i)}$ — стандартное отклонение, характеризующее временное распределение событий, зарегистрированных γ -детектором i , в совпадениях с сигналом от

α -детектора, $\text{FWHM}_t^{(i)} = 2,35\sigma_t^{(i)}$ — временное разрешение системы (α - γ)-совпадений, соответствующее γ -детектору i ; K — число стандартных отклонений, одинаковое для всех 22 систем (α - γ)-совпадений, равное 3.

После определения границ временных интервалов регистрации γ -квантов в совпадениях с α -детектором для каждого из 22 γ -детекторов производится построение амплитудных спектров γ -событий, лежащих в выбранных временных интервалах и в интервале энергий γ -квантов от 0,2 до 6 МэВ (0,2 МэВ — аппаратный порог в спектрометрическом канале регистрации γ -квантов).

На рис. 7, *a–в* в качестве примера приведены энергетические распределения событий, зарегистрированных γ -детекторами, расположенными под углами 30, 90 и 150°, в указанных временных интервалах.

Таким образом, в результате анализа экспериментальных данных были получены 22 амплитудных распределения, каждое из которых соответствовало определенному γ -детектору i .

Следующим этапом анализа данных амплитудных распределений являлось определение числа событий, зарегистрированных каждым из γ -детекторов в совпадениях с сигналом от α -детектора и лежащих в области пиков полного поглощения, временные границы которых определены согласно уравнениям (5). Для этого полученные экспериментальные распределения γ -квантов для каждого γ -детектора были профитированы функцией F от энергии E следующего вида:

$$F(E) = \text{Peak}(E) + \text{Compton}(E) + \text{Background}(E), \quad (6)$$

где $\text{Peak}(E)$ — функция Гаусса, описывающая пик полного поглощения с энергией 4,43 МэВ с учетом энергетического разрешения детектора:

$$\text{Peak}(E) = \frac{A}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(E - E_0)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (7)$$

где E_0 — энергия, соответствующая центру тяжести пика полного поглощения (4,438 МэВ); σ — стандартное отклонение, соответствующее распределению Гаусса; A — площадь под пиком (количество событий).

$\text{Compton}(E)$ — функция, описывающая вклад в распределение зарегистрированных событий за счет регистрации γ -квантов, испытавших комптоновское рассеяние в детекторе. Аналитическое выражение для данной функции было получено с использованием данных моделирования методом Монте-Карло для применяемой геометрии эксперимента и характеристик детекторов. В интервале энергий, соответствующем пику полного поглощения, она может быть представлена как (7) с фиксированными параметрами, полученными по модельным данным;

$\text{Background}(E) = aE + b$ — фон случайных событий; константы a и b определены для каждого детектора на основании результатов анализа амплитудных спектров зарегистрированных событий в интервале энергий 4,8–6,0 МэВ.

На рис. 8, *a–в* приведено разложение амплитудного спектра в области энергий, соответствующих пику полного поглощения γ -квантов с энергией 4,43 МэВ, на составляющие для детекторов, расположенных под углами 30, 90 и 150°

В результате фитирования экспериментальных амплитудных распределений событий, зарегистрированных каждым из 22 γ -детекторов, с помощью выражения (6) определены

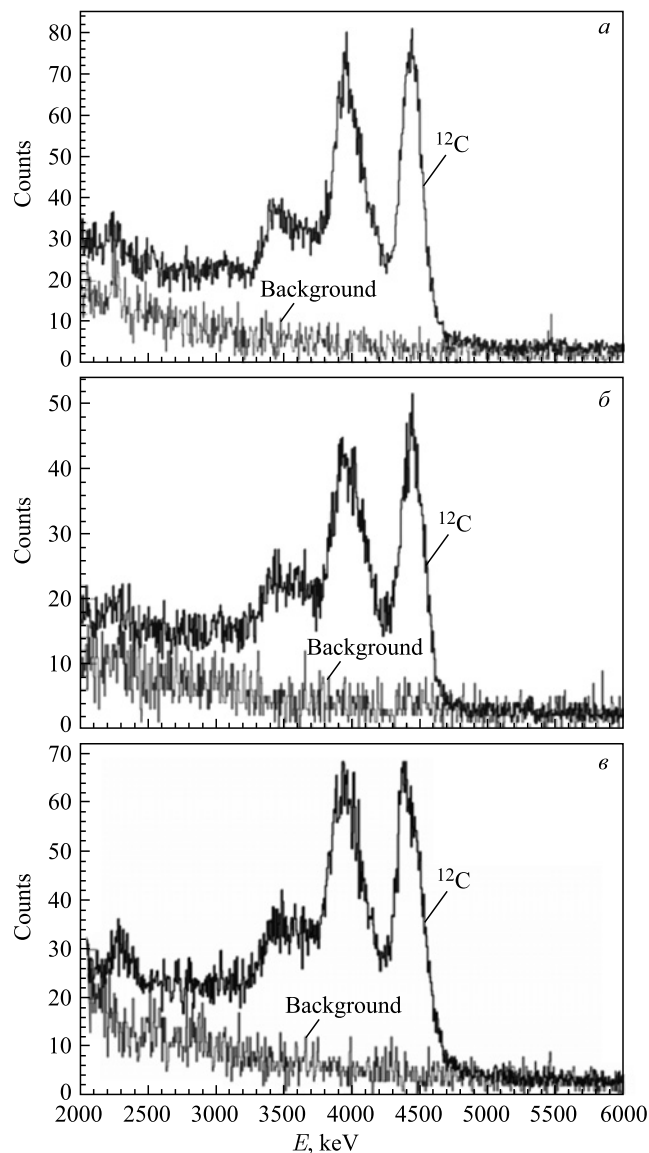


Рис. 7. Энергетическое распределение событий, зарегистрированных γ -детектором, расположенным под углом 30° (а), 90° (б) и 150° (в)

числа зарегистрированных событий, соответствующие пикам полного поглощения. Затем полученное число событий было усреднено для каждой пары γ -детекторов, симметрично расположенных под определенным полярным углом относительно оси центрального меченого пучка нейтронов.

Для количественного описания анизотропии углового распределения γ -квантов, образующихся в реакции неупругого рассеяния, введем параметр анизотропии W , опреде-

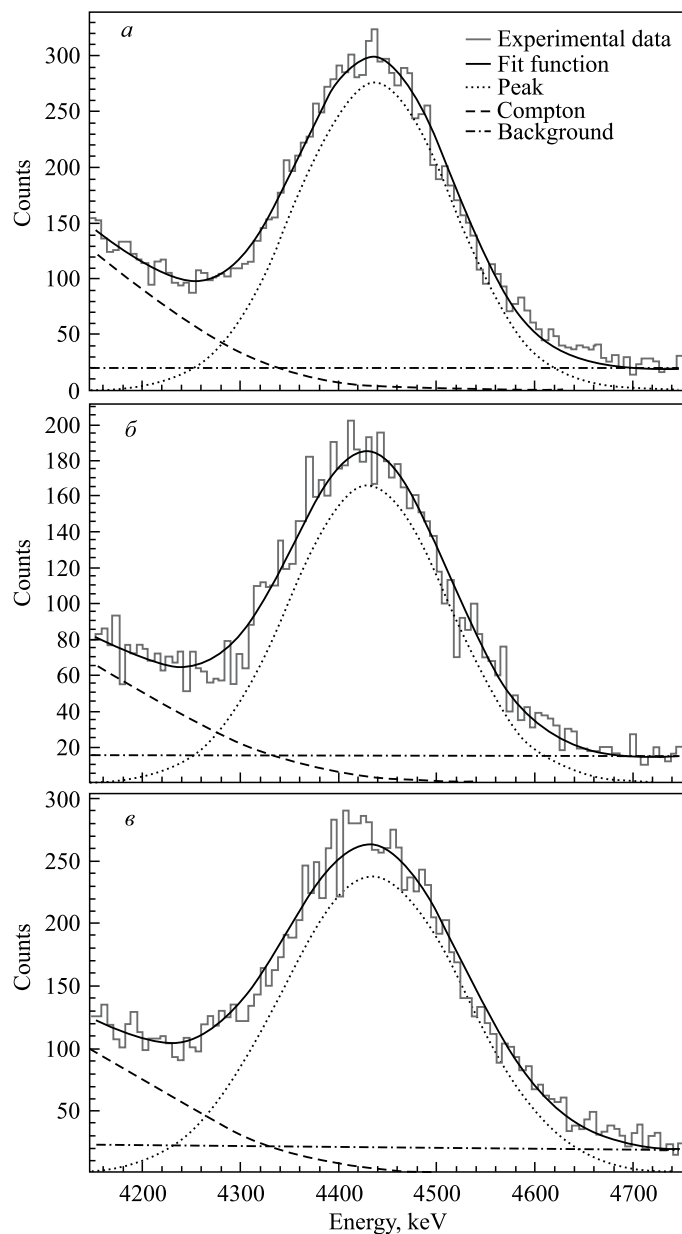


Рис. 8. Разложение амплитудного спектра в области пика полного поглощения γ -квантов с энергией 4,43 МэВ на составляющие для детектора, расположенного под углом 30° (а), 90° (б) и 150° (в)

ляемый как отношение числа событий, зарегистрированных детектором, расположенным под углом θ к числу событий, зарегистрированных детектором, расположенным под углом 90° :

$$W(\theta) = 1 + a \cos^2 \theta - b \cos^4 \theta. \quad (8)$$

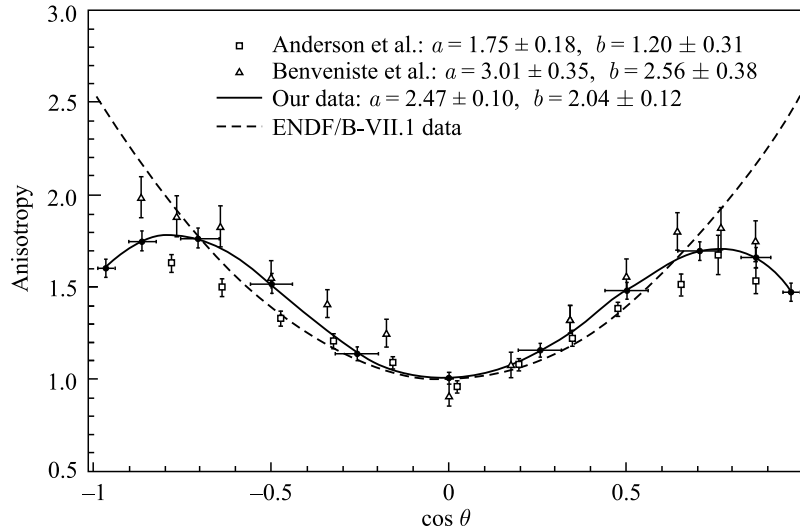


Рис. 9. Измеренная анизотропия углового распределения γ -квантов с энергией 4,43 МэВ, ее сравнение с библиотечными и другими экспериментальными данными

На рис. 9 представлена зависимость параметра анизотропии испускания γ -квантов из реакции (1) от полярного угла θ , полученная по результатам обработки экспериментальных данных. Ошибки по углу θ (угловое разрешение детекторов) были получены методом Монте-Карло при помощи пакета Geant4 [34]. Установленную угловую зависимость можно описать используя (8) с параметрами $a = 2,47 \pm 0,10$ и $b = 2,04 \pm 0,12$. Приведенные ошибки величин a и b являются статистическими. Что касается систематических ошибок, то в настоящее время производится изучение природы возможных их источников.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Использование метода меченых нейтронов позволило с высокой точностью измерить угловое распределение γ -квантов с энергией 4,43 МэВ, образующихся в реакции неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14,1 МэВ на ядрах углерода с возбуждением первого его уровня.

2. В пределах статистических ошибок измерения наблюдается согласие между результатами настоящей работы и наиболее точными результатами, полученными ранее в работах [5, 13].

3. Параметры анизотропии в угловом распределении γ -квантов с энергией 4,43 МэВ, образующихся в результате неупругого рассеяния нейтронов на ядрах ^{12}C , содержащиеся в библиотеках оцененных данных, не включают в себя полином четвертой степени, что приводит к заметному различию между модельными и экспериментальными результатами для полярных углов, меньших 45° и больших 135° .

Следующим этапом намеченной физической программы является измерение угловых корреляций между направлениями вылета из мишени нейтронов и γ -квантов, образующихся в реакции $^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}^* \xrightarrow{\gamma} ^{12}\text{C}$.

Авторы выражают искреннюю благодарность руководству ООО «Нейтронные технологии» за предоставленный на время выполнения настоящего эксперимента нейтронный генератор ИНГ-27, а также Н. И. Замятину, М. Г. Сапожникову и В. М. Слепневу за ценные и полезные замечания, касающиеся выбора оптимальных параметров установки TANGRA, и О. Г. Тарасову за разработку и создание системы перемещения нейтронного профилометра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ruskov I. N. et al.* TANGRA-Setup for the Investigation of Nuclear Fission Induced by 14.1 MeV Neutrons // *Phys. Procedia*. 2015. V. 64. P. 163–170; <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389215001388>.
2. *Grozdanov D. N., Zontikov A. O.* Optimization of “Romashka” Setup for Investigation of $(n, n'\gamma)$ -Reactions with Tagged Neutrons Method // *Proc. of ISINN-23, Dubna, 2015*; <http://isinn.jinr.ru/past-isinns/isinn-23/program.html>.
3. *Bystritsky V. M. et al.* Multilayer Passive Shielding of Scintillation Detectors Based on BGO, NaI(Tl) and Stilbene Crystals Operating in Intense Neutron Fields with an Energy of 14.1 MeV // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2015. V. 12, No. 2. P. 325–335.
4. *Kopatch Yu. N. et al.* Angular Correlation of Gamma-Rays in the Inelastic Scattering of 14 MeV Neutrons on Carbon // *Proc. of ISINN-23, Dubna, 2015*. <http://isinn.jinr.ru/past-isinns/isinn-23/progr-29.05.2015/Kopatch.pdf>.
5. *Anderson J. D. et al.* Inelastic Scattering of 14-MeV Neutrons from Carbon and Beryllium // *Phys. Rev.* 1958. V. 111, No. 2. P. 572.
6. *Zamudio J., Romero L., Morales R.* Angular Correlation Measurements of $^{12}\text{C}(n, n'\gamma)^{12}\text{C}$ at 14.7 MeV // *Nucl. Phys. A*. 1967. V. 96. P. 449.
7. *Deconninck G., Martegani A.* Angular Correlation in $^{12}\text{C}(n, n'\gamma)^{12}\text{C}$ at 14 MeV // *Nucl. Phys.* 1960. V. 20. P. 33.
8. *Spaargaren D., Jonker C. C.* Angular Correlations in Inelastic Neutron Scattering by Carbon at 15.0 MeV // *Nucl. Phys. A*. 1971. V. 161. P. 354.
9. *Benetskij B. A., Frank I. M.* Angular Correlation between Gamma Rays and 14-MeV Neutrons Scattered Inelastically by Carbon // *Sov. Phys. JETP*. 1963. V. 17, No. 2. P. 309.
10. *Sherr R., Hornyak W. F.* // *Bull. Am. Phys. Soc.* 1956. P. 197.
11. *Gul K. et al.* Scattering of 14.7 MeV Neutrons from ^{12}C and Evidence for a New Reaction Channel // *Phys. Rev. C*. 1981. V. 24, No. 6. P. 2458.
12. *Clarke R. L., Cross W. G.* Elastic and Inelastic Scattering of 14.1 MeV Neutrons from C, Mg, Si, and S // *Nucl. Phys.* 1964. V. 53. P. 177.
13. *Benveniste J. et al.* Gamma Rays from the Interaction of 14-MeV Neutrons with Carbon // *Nucl. Phys.* 1960. V. 19. P. 445.
14. *Stewart D. T., Martin P. W.* Gamma Rays from the Interaction of 14 MeV Neutrons with ^{12}C and ^{24}Mg // *Nucl. Phys.* 1964. V. 60. P. 349.
15. *Aleksakhin V. Yu. et al.* Detection of Diamonds in Kimberlite by the Tagged Neutron Method // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2015. V. 785. P. 9.
16. *Waldschlaeger U.* // *Spectrochim. Acta. Part B*. 2006. V. 61, No. 10–11. P. 1115.
17. *Ревенко А. Г.* Особенности методик анализа геологических образцов с использованием рентгенофлуоресцентных спектрометров с полным внешним отражением (TXRF) // *Аналитика и контроль*. 2010. Т. 14, № 2. С. 42–64.

18. Fedorovsky V. S., Sklyarov E. V. The Olkhon Geodynamic Proving Ground (Lake Baikal): High Resolution Satellite Data and Geological Maps of New Generation // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2010. V. 1, No. 4. P. 331–418.
19. Riashchenko T. G., Ukhova N. N. The Chemical Composition of Dispersed Ground: Opportunities and Forecasts (South of Eastern Siberia). Irkutsk, Inst. of the Earth's Crust, Sib. Branch of RAS, 2008. P. 131 (in Russian).
20. Shirey S. B. et al. Diamonds and the Geology of Mantle Carbon // *Rev. Mineral.* 2013. V. 75. P. 355–421.
21. Никитин Г. М. и др. Обнаружение алмазов в кимберлите с помощью метода меченых нейтронов // *Горный журн. Казахстана*. 2014. № 3. С. 13.
22. Ussery L. I. et al. Los Alamos Nat. Lab. Report LA12847-MS. 1994.
23. Rhodes E. et al. // *SPIE*. 1993. V. 2092. P. 288;
Rhodes E. et al. // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1992. V. 39. P. 1041–1045.
24. Pesenti S. et al. // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2004. V. 531. P. 657.
25. Bystritsky V. M. et al. // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2008. V. 5. P. 441.
26. Быстрицкий В. М. и др. // *Междунар. научно-техн. конф. «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе»*: Сб. докл. М.: ВНИИА, 2013. С. 547.
27. Алексахин В. Ю. и др. // Там же. С. 555.
28. Быстрицкий В. М. и др. // Там же. С. 568.
29. Быстрицкий В. М. и др. // Там же. С. 572.
30. Быстрицкий В. М. и др. // Там же. С. 582.
31. Alexakhin V. Yu. et al. // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2015. V. 785. P. 9–13.
32. Хасаев Т. О. и др. // *Междунар. научно-техн. конф. «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе»*: Сб. докл. М.: ВНИИА, 2013. С. 60.
33. Бармаков Ю. Н. и др. // *Междунар. научно-техн. конф. «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе»*: Сб. докл. М.: ВНИИА, 2004. С. 15.
34. Agostinelli S. et al. GEANT4 — a Simulation Toolkit // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2003. V. 506. P. 250–303.

Получено 15 декабря 2015 г.