

## ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ГАММА-КВАНТОВ В РЕАКЦИЯХ НЕУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 14.1 МэВ НА ЯДРАХ УГЛЕРОДА И КИСЛОРОДА

© 2018 г. Д. Н. Грозданов<sup>1),2)</sup>, Н. А. Федоров<sup>1),3)\*</sup>, В. М. Быстрицкий<sup>1)</sup>, Ю. Н. Копач<sup>1)</sup>, И. Н. Русков<sup>1),2)</sup>, В. Р. Ской<sup>1)</sup>, Т. Ю. Третьякова<sup>4)</sup>, Н. И. Замятин<sup>1)</sup>, Д. Ван<sup>1),5)</sup>, Ф. А. Алиев<sup>1),6)</sup>, К. Храмко<sup>1),7)</sup>, А. Ганди<sup>8)</sup>, А. Кумар<sup>8)</sup>, С. Дабылова<sup>1)</sup>, Е. П. Боголюбов<sup>9)</sup>, Ю. Н. Бармаков<sup>9)</sup>

Поступила в редакцию 11.01.2018 г.

Представлены результаты измерения угловых и энергетических распределений  $\gamma$ -квантов, образующихся в реакциях неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядрах углерода и кислорода. Измерения проведены с использованием метода меченых нейтронов на пучке стандартного портативного нейтронного генератора ИНГ-27. Получены угловые распределения  $\gamma$ -квантов из состояний  $4.43(2^+)$  в  $^{12}\text{C}$  и  $6.13(3^-)$  МэВ в  $^{16}\text{O}$ .

DOI: 10.1134/S0044002718050069

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Основной целью проекта TANGRA (Tagged Neutron and Gamma RAys — меченые нейтроны и  $\gamma$ -лучи) в ОИЯИ [1, 2] является детальное изучение рассеяния быстрых нейтронов на атомных ядрах с использованием метода меченых нейтронов. Измерение угловых  $n\gamma$ -корреляций в реакции неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ дает дополнительную информацию о механизме взаимодействия ядра с налетающим нуклоном и эффективном нуклон-нуклонном потенциале [3]. Информация о процессах такого типа существенно беднее по сравнению с имеющимися данными реакций неупругого рассеяния заряженных частиц на атомных ядрах. Для теоретических исследований в области ядерной физики и

ядерной астрофизики интересным является сравнение неупругого рассеяния нейтронов и протонов, что позволяет исследовать изоспиновую симметрию нуклон-нуклонных взаимодействий. Интерес к реакциям  $(n, n'\gamma)$  на легких и средних по массе элементах продиктован также необходимостью уточнения ранее полученных экспериментальных данных, поскольку подобные реакции имеют широкое практическое применение в геологии при определении элементного состава горных пород [4, 5]. В атомной энергетике эти реакции необходимы для описания цепочек размножения нейтронов, а также важны при создании приборов для обнаружения скрытых опасных веществ [6, 7].

Метод меченых нейтронов (ММН) основан на регистрации  $\alpha$ -частиц с энергией 3.5 МэВ, образующихся в реакции



и имеющих практически противоположное направление вылета по отношению к направлению вылета нейтрона. При этом энергия нейтрона составляет 14.1 МэВ. Регистрация происходит в совпадении с характеристическим ядерным  $\gamma$ -излучением, возникающим в результате неупругого рассеяния нейтронов на ядрах мишени. Схематически эти реакции можно представить в виде



Таким образом, фиксируя направление вылета  $\alpha$ -частицы, можно восстановить направление вылета нейтрона — “пометить” его. На практике

<sup>1)</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия.

<sup>2)</sup>Институт ядерных исследований и ядерной энергетики Болгарской академии наук, София.

<sup>3)</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия.

<sup>4)</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Россия.

<sup>5)</sup>Сианьский Университет Цзяо Тун, Китай.

<sup>6)</sup>Институт геологии и геофизики НАН Азербайджана, Баку.

<sup>7)</sup>Институт химии Академии наук Молдовы, Кишинев.

<sup>8)</sup>Бенаресский индуистский университет, Варанаси, Индия.

<sup>9)</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт автомашины им. Н.Л. Духова, Москва.

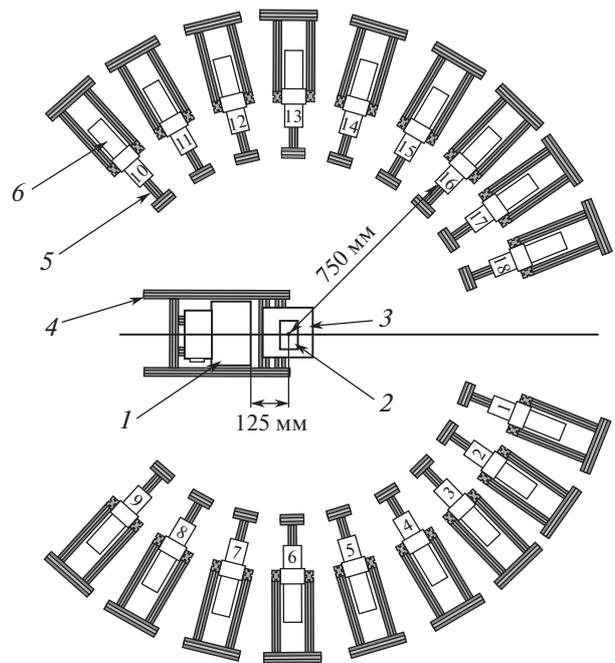
\*E-mail: na.fedorov@physics.msu.ru

“мечение” нейтрона осуществляется с помощью позиционно-чувствительного  $\alpha$ -детектора, встроенного в нейтронный генератор. Знание числа меченых нейтронов, падающих на мишень, числа совпадений  $n\gamma$ , размеров мишени, а также эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов характеристического ядерного излучения позволяет корректно определить дифференциальные сечения процессов неупругого рассеяния нейтронов на ядрах исследуемых изотопов с возбуждением определенных уровней. Важным преимуществом ММН является возможность мониторинга потока меченых нейтронов с высокой эффективностью и тем самым существенное снижение вклада фоновых событий в результирующие  $\gamma$ -спектры.

В предыдущей нашей работе [8] представлены результаты измерений углового распределения  $\gamma$ -излучения в реакции неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядрах  $^{12}\text{C}$ , выполненных на установке TANGRA с детектирующей системой на основе кристаллов NaI(Tl) с использованием защитного коллиматора нейтронного пучка. Использование ММН позволило повысить точность измерений, что имеет принципиальное значение, поскольку имеющиеся в литературе данные существенно различаются между собой. Выбранная геометрия установки позволила впервые провести измерения при вылете  $\gamma$ -квантов под углами менее  $10^\circ$ . Для тестирования новой системы детектирования были повторены измерения на углероде. В работе представлены результаты измерения углового распределения  $\gamma$ -квантов в реакции  $(n, n'\gamma)$  на ядрах  $^{12}\text{C}$  и  $^{16}\text{O}$ .

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки TANGRA приведена на рис. 1. В качестве источника нейтронов с энергией 14.1 МэВ используется портативный генератор нейтронов ИНГ-27, работающий в непрерывном режиме, который обеспечивает ускорение дейтронов до энергий 80–100 кэВ и их фокусировку на тритиевой мишени. Максимальная интенсивность потока нейтронов в  $4\pi$ -геометрии, создаваемого генератором, составляет  $5 \times 10^7 \text{ c}^{-1}$ .  $\alpha$ -частицы с энергией 3.5 МэВ регистрируются встроенным в генератор 64-пиксельным кремниевым детектором с размерами пикселя  $6 \times 6 \text{ мм}$ , расположенным на расстоянии 100 мм от тритиевой мишени. Для регистрации  $\gamma$ -квантов используются 18 сцинтилляционных детекторов на основе кристаллов ВГО диаметром 76 мм и толщиной 65 мм. Детекторы  $\gamma$ -квантов расположены в горизонтальной плоскости по окружности радиусом 750 мм с шагом по углу  $14^\circ$ . В отличие от предыдущего эксперимента [8] в данной конфигурации отсутствует



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки TANGRA: 1 — генератор ИНГ-27, 2 — мишень, 3 — держатель мишени, 4 — алюминиевая рама установки, 5 — подставки для детекторов  $\gamma$ -излучения, 6 — детекторы  $\gamma$ -излучения, пронумерованные от 1 до 18.

дополнительная пассивная коллимация нейтронного пучка, падающего на мишень, что позволило сократить расстояние от источника нейтронов до исследуемого образца до 125 мм. Селекция фоновых событий производится по методу времени пролета: известны энергия падающего нейтрона (14.1 МэВ) и расстояния как от тритиевой мишени генератора до облучаемого образца из углерода (кислорода), так и от образца до  $\gamma$ -детекторов. Поэтому для дальнейшей обработки отбираются события, лежащие в узком временном интервале, начало которого задается  $\alpha$ -частицей из реакции (1). Это позволяет проводить эффективное разделение  $\gamma$ -квантов и нейтронов, попавших в  $\gamma$ -детектор, по времени пролета. Для сбора и предварительного анализа данных используется компьютер с двумя АЦП ADCM-16 [9].

Перед началом набора статистики с исследуемыми образцами была произведена юстировка пучка нейтронного генератора относительно центральной оси установки. Для измерения пространственных характеристик 64 меченых пучков нейтронов используется двухкоординатный стриповый кремниевый детектор (профилометр), состоящий из 16-ти перекрещивающихся стрипов (восьми вертикальных и восьми горизонтальных), дающих в результате 64 квадратные зоны (пикселя) со сторонами 15 мм. Детектирование быстрых нейтронов

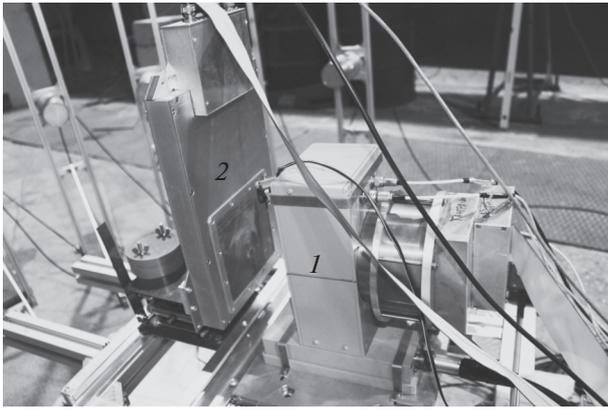


Рис. 2. Измерение профиля нейтронного пучка: 1 — генератор ИНГ-27, 2 — профилометр.

в профилометре осуществляется в результате протекания реакций  $^{28}\text{Si}(n, p)^{28}\text{Al}$  и  $^{28}\text{Si}(n, \alpha)^{25}\text{Mg}$ . На рис. 2 представлено расположение генератора ИНГ-27 и профилометра при измерении профиля нейтронного пучка.

В качестве мишеней в экспериментах по неупругому рассеянию быстрых нейтронов на углероде и кислороде использовались блоки размерами  $10 \times 10 \times 5$  см из углерода и стекла (в основном состоящего из  $\text{SiO}_2$ ) соответственно. Толщина образца по пучку нейтронов составляла 5 см. Выбор размеров образцов был осуществлен на основе результатов моделирования [8]. Также измерения рассеяния нейтронов на кислороде были произведены на водяной мишени (контейнер  $10 \times 10 \times 10$  см).

### 3. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Сигналы, поступающие с  $\alpha$ - и  $\gamma$ -детекторов установки TANGRA, оцифровываются с помощью ADCM и записываются на жесткий диск компьютера, после чего происходит их анализ путем построения временных и амплитудных спектров событий с разделением зарегистрированных нейтронов и  $\gamma$ -квантов по времени пролета. На рис. 3 в качестве примера показаны временные спектры событий, зарегистрированных  $\gamma$ -детекторами, расположенными под углами  $1^\circ$  и  $130^\circ$  относительно одного из нейтронных пучков. В отличие от работы [8], где анализ данных проводился на статистике, полученной в совпадениях с сигналом от центрального пикселя  $\alpha$ -детектора, в настоящем эксперименте учитывались совпадения сигналов с 36-ю пикселями  $\alpha$ -детектором. Как видно на рис. 3, во временном распределении наблюдается два пика: пик 1, обусловленный регистрацией характеристического  $\gamma$ -излучения возбужденного ядра, и пик 2,

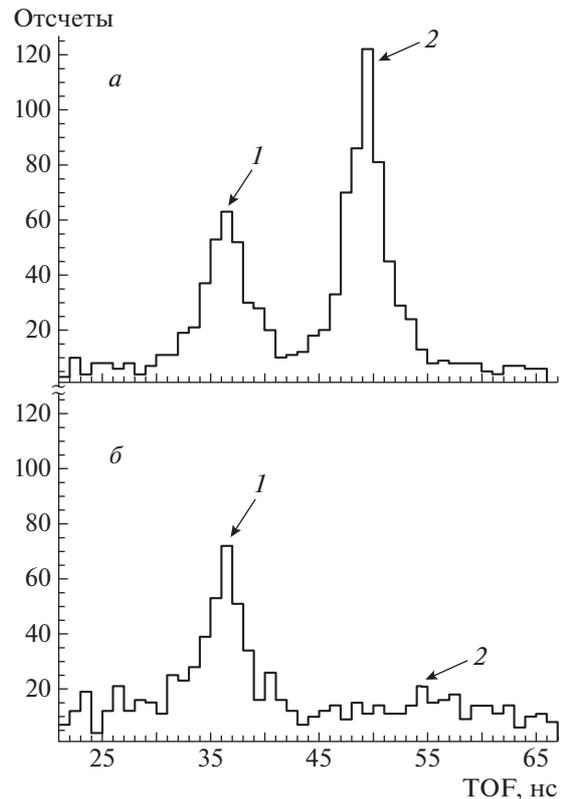


Рис. 3. Временные спектры сигналов, поступающих с  $\gamma$ -детекторов: а — временной спектр событий, зарегистрированных  $\gamma$ -детектором № 1, расположенным под углом  $1^\circ$  по отношению к одному из меченых пучков; б — аналогичный спектр с детектора № 9, находящегося под углом  $130^\circ$  к тому же пучку. Пик 1 соответствует  $\gamma$ -квантам, пик 2 — нейтронам.

соответствующий регистрации нейтронов, попавших в  $\gamma$ -детектор.

Энергетические спектры событий, попадающих во временное окно, соответствующее  $\gamma$ -квантам (пик 1 на рис. 3), строятся для каждой комбинации совпадений  $\alpha$ -детектор— $\gamma$ -детектор с использованием энергетической калибровки  $\gamma$ -детекторов. Так как детекторы  $\gamma$ -квантов расположены в горизонтальной плоскости, угол между направлением вылета  $\gamma$ -кванта, зарегистрированного детектором, и направлением меченого нейтронного пучка слабо зависит от вертикальной координаты  $\alpha$ -детектора ( $Y$ -координаты) и определяется положением пикселя  $\alpha$ -детектора по горизонтали ( $X$ -координата). Поэтому при проведении анализа все пиксели  $\alpha$ -детектора были сгруппированы по  $Y$ -координате, образуя при этом восемь стрипов по  $X$ -координате. Расположение и размеры образцов были выбраны таким образом, чтобы они покрывались матрицей пикселей  $6 \times 6$ . При этом в анализе использовалась матрица  $4 \times 6$  (четыре пикселя по  $X$ -координате и шесть пикселей по  $Y$ -координате). Крайние стрипы по  $X$ -координате

были отброшены, так как для них наблюдалась большая асимметрия счета  $\gamma$ -детекторами, расположенными справа и слева от образца, что, по-видимому, обусловлено поглощением  $\gamma$ -квантов в самом образце. Кроме того, поскольку детекторы  $\gamma$ -квантов № 1 и № 18 попадали внутрь области меченых пучков, данные этих детекторов с соответствующими XY-пикселями, образующими прямые нейтронные пучки, попадающие в перечисленные детекторы, в анализе не учитывались.

Из полученных для каждого анализируемого стрипа энергетических  $\gamma$ -спектров извлекается информация о числе событий, соответствующих излучению  $\gamma$ -квантов при переходе ядра из определенного возбужденного состояния в более низкое энергетическое состояние. Обычно учитываются только события, лежащие в пределах пика полного поглощения энергии  $\gamma$ -кванта в детекторе либо пика одиночного вылета аннигиляционного  $\gamma$ -кванта с энергией 0.511 МэВ.

Для количественного описания анизотропии углового распределения  $\gamma$ -квантов вводится параметр анизотропии  $W(\theta)$ , определяемый как отношение событий, зарегистрированных под углом  $\theta$ , к числу событий, зарегистрированных под углом  $90^\circ$ . Экспериментально полученные угловые распределения  $\gamma$ -квантов аппроксимируются разложением по полиномам Лежандра:

$$W(\theta) = 1 + \sum_{i=2}^{2J} a_i P_i(\cos \theta), \quad (3)$$

где  $a_i$  — коэффициенты разложения,  $J$  — мультипольность  $\gamma$ -перехода, а индекс суммирования  $i$  принимает только четные значения.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

При неупругом рассеянии нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядрах  $^{12}\text{C}$  происходит возбуждение только одного состояния, которое распадается путем испускания  $\gamma$ -кванта с энергией 4.43 МэВ и мультипольностью  $E2$ . Другие уровни возбуждения ядерно нестабильны. Угловое распределение  $\gamma$ -квантов данного перехода приведено на рис. 4 для событий, лежащих в пределах пика полного поглощения. То, что число этих точек больше, чем число детекторов (см. рис. 1), и угловой интервал между ними меньше, чем угловой интервал между  $\gamma$ -детекторами, является особенностью ММН, который позволяет использовать нейтроны, вылетающие не только вдоль оси установки, но и в пределах всевозможных углов, определяемых апертурой  $\alpha$ -детектора в генераторе.

Коэффициенты  $a_i$  в разложении по полиномам Лежандра в выражении (3) приведены в табл. 1 в

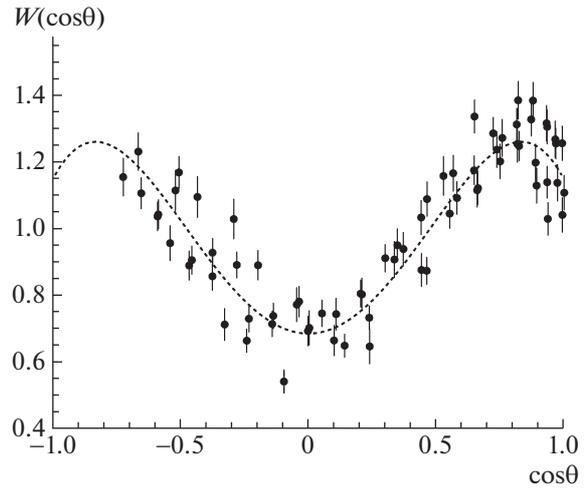


Рис. 4. Угловое распределение  $\gamma$ -квантов с энергией 4.43 МэВ, образующихся при неупругом рассеянии нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядрах  $^{12}\text{C}$ .

сравнении с результатами работ [10–12]. Результаты настоящего эксперимента и коэффициенты из работы [8] приведены со статистическими отклонениями. Учет вкладов систематических ошибок измерения требует дополнительного моделирования и проведения дополнительных измерений и в данный момент находится в стадии разработки. Необходимо оценить вклад перерассеяния нейтронов и поглощение  $\gamma$ -квантов в образце, влияние конечности телесных углов, определяемых ширинами меченых пучков и диаметрами  $\gamma$ -детекторов, учесть различие эффективностей регистрации  $\gamma$ -квантов при различной загрузке. Включение в анализ данных нескольких меченых пучков позволило существенно повысить набранную статистику, однако привело к усложнению обработки экспериментальных данных. В пределах статистических ошибок измерения полученные результаты согласуются с результатами, полученными ранее. Следует отметить важность результатов, полученных при малых углах испускания  $\gamma$ -квантов. В библиотеках оцененных данных параметры анизотропии углового распределения  $\gamma$ -квантов с энергией 4.43 МэВ в реакции  $(n, n'\gamma)$  на ядрах  $^{12}\text{C}$  не включают в себя полином четвертой степени, что приводит к заметному различию между результатами модельного расчета и экспериментальными данными в области углов, меньших  $45^\circ$ .

Спектр возбужденных состояний в ядре  $^{16}\text{O}$  имеет более сложную структуру по сравнению со спектром в  $^{12}\text{C}$ , что отражается на экспериментальных данных. На рис. 5 представлены энергетические спектры  $\gamma$ -квантов в реакции  $(n, n'\gamma)$  на мишенях из стекла, в основном состоящего из  $\text{SiO}_2$ , и воды. В обоих спектрах наиболее ярко выделяется пик при энергии 6.13 МэВ, соответствующий

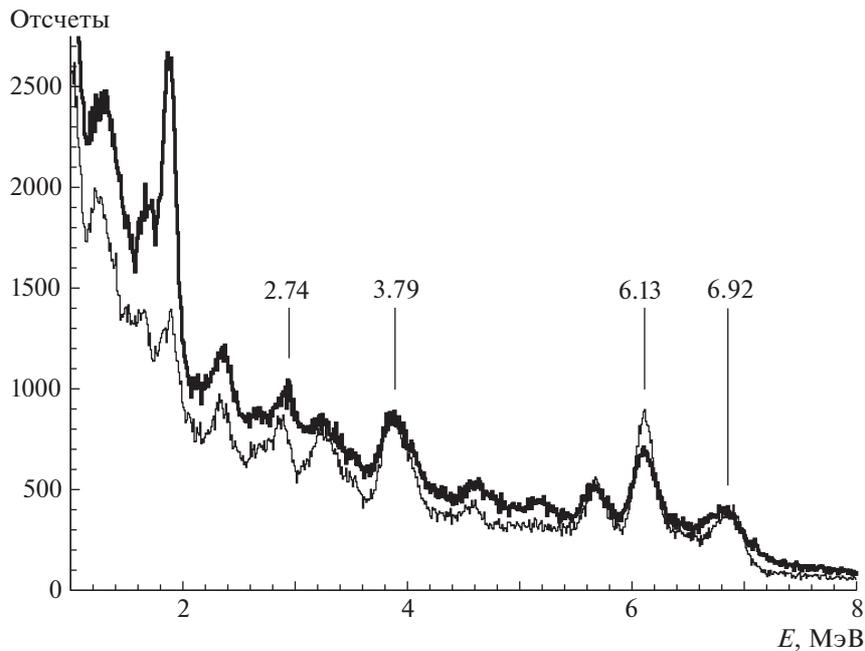


Рис. 5. Энергетические спектры  $\gamma$ -квантов в реакции  $(n, n'\gamma)$  на мишенях из стекла (жирная линия) и воды (тонкая).

переходу мультипольности  $E3$  из состояния, имеющего спин-четность  $J^\pi = 3^-$  в основное состояние  $0_{g.s}^+$  ( $3^- \rightarrow 0_{g.s}^+$ ) в ядре  $^{16}\text{O}$ . При более высоких энергиях выделяется пик при энергии 6.92 МэВ, который может быть сформирован за счет перехода из следующего возбужденного состояния  $J^\pi = 2^+$ . Структура спектра при  $E^*$  меньше 6 МэВ сложнее в интерпретации. В случае рассеяния на стекле  $\gamma$ -кванты из реакции  $(n, n'\gamma)$  на ядрах кремния приносят существенный вклад в резонанс в ядре  $^{16}\text{O}$  с энергией 1.7 МэВ, обусловленный переходом из состояния  $2^-(8.87 \text{ МэВ})$  в  $1^-(7.12 \text{ МэВ})$ . Пики в спектрах при 2.74 и 3.79 МэВ могут быть результатом возбуждения более высоких состояний  $^{16}\text{O}$  и соответствовать  $\gamma$ -переходам  $2^-(8.87 \text{ МэВ}) \rightarrow 3^-(6.13 \text{ МэВ})$  и  $2^+(9.84 \text{ МэВ}) \rightarrow 0^+(6.05 \text{ МэВ})$ . Однако резонанс в полученных спектрах при энер-

гии 3.8 МэВ может быть также сформирован за счет девозбуждения ядра  $^{13}\text{C}$ , образующегося в реакции  $^{16}\text{O}(n, \alpha)^{13}\text{C}$  [13]. Определенный вклад в структуру спектра в данном диапазоне энергий дают также аннигиляционные  $\gamma$ -кванты, возникающие за счет рождения электрон-позитронных пар в веществе мишени.

В результате анализа событий, соответствующих пику полного поглощения  $\gamma$ -квантов с энергией 6.13 МэВ, была получена зависимость параметра анизотропии  $W$  от угла  $\theta$ . Экспериментальные значения и аналитическая аппроксимация по формуле (3) показаны на рис. 6. Коэффициенты разложения по полиномам Лежандра  $a_i$  приведены в табл. 2 в сравнении с коэффициентами, полученными нами при аппроксимации экспериментальных результатов работы [13] и данных, приведенных в базе данных ЦДФЭ НИИЯФ МГУ [14]. Следует отметить, что по сравнению с количеством экспериментов по неупругому рассеянию нейтронов на углероде, данные по угловому распределению  $\gamma$ -излучения в рассеянии нейтронов с энергией 14 МэВ на ядрах  $^{16}\text{O}$  чрезвычайно бедны. Данные нашего эксперимента находятся в соответствии с результатами предшествующих измерений, но различаются существенно меньшей погрешностью. Особый интерес представляет вклад многочленов высокого порядка, поскольку поведение анизотропии важно не только с точки зрения моделирования и практического применения, но и для теоретического описания неупругого рассеяния нейтронов. В данном случае высокая мультипольность перехода приводит к более сложной угловой зависимости,

Таблица 1. Коэффициенты разложения по полиномам Лежандра для углового распределения  $\gamma$ -квантов в реакции  $(n, n'\gamma)$  на ядрах  $^{12}\text{C}$

Литература	$a_2$	$a_4$
Anderson (1958) [10]	$0.36 \pm 0.04$	$-0.20 \pm 0.05$
Benveniste (1960) [11]	$0.36 \pm 0.08$	$-0.39 \pm 0.09$
Spaargaren (1971) [12]	$0.40 \pm 0.04$	$-0.37 \pm 0.06$
Быстрицкий (2016) [8]	$0.34 \pm 0.03$	$-0.33 \pm 0.03$
Настоящая работа	$0.42 \pm 0.02$	$-0.27 \pm 0.02$

**Таблица 2.** Коэффициенты разложения по полиномам Лежандра для углового распределения  $\gamma$ -квантов в реакции  $(n, n'\gamma)$  на ядрах  $^{16}\text{O}$  (значения  $a_i$  получены аппроксимацией данных по угловому распределению  $\gamma$ -излучения из работ [13, 14])

Литература	$a_2$	$a_4$	$a_6$
Kozlowski (1965) [14]	$0.2 \pm 0.3$	$-0.3 \pm 0.5$	$-0.7 \pm 0.5$
Morgan (1964) [14]	$0.34 \pm 0.04$	$0.01 \pm 0.06$	$-0.04 \pm 0.06$
McDonald (1966) [13]	$0.22 \pm 0.08$	$-0.05 \pm 0.10$	$-0.32 \pm 0.08$
Настоящая работа	$0.34 \pm 0.02$	$0.10 \pm 0.02$	$-0.26 \pm 0.08$

которая пока качественно не воспроизведена в теоретических подходах [13].

### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На установке TANGRA с использованием метода меченых нейтронов на пучке стандартного портавного нейтронного генератора ИНГ-27 проведено исследование реакции неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядрах углерода и кислорода. В анализ были включены данные нескольких меченых пучков нейтронов, что позволило улучшить статистику экспериментальных данных и впервые измерить анизотропию  $\gamma$ -излучения с разрешением более восьми точек на угловой интервал  $10^\circ$ .

Получено угловое распределение  $\gamma$ -квантов из первого возбужденного состояния  $4.43(2^+)$  в  $^{12}\text{C}$ . Значения коэффициентов разложения функции анизотропии по полиномам Лежандра находятся в соответствии с результатами предыдущих измерений. Важными являются полученные впервые данные при углах вылета  $\gamma$ -квантов по отношению

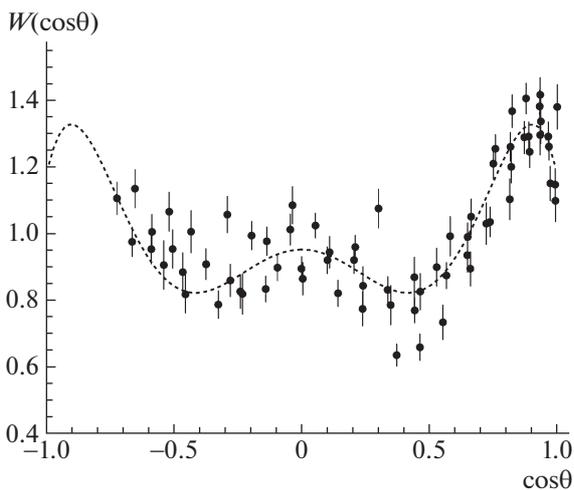
к направлению падающего на мишень нейтрона, меньших чем  $10^\circ$ .

С высокой точностью проведены измерения углового распределения из возбужденного состояния  $6.13(3^-)$  МэВ в  $^{16}\text{O}$ . Впервые экспериментально получены параметры анизотропии  $\gamma$ -излучения в реакции  $(n, n'\gamma)$  при энергии нейтронов 14.1 МэВ.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 16-52-45056).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. N. Ruskov, Yu. N. Kopatch, V. M. Bystritsky, V. R. Skoy, V. N. Shvetsov, F.-J. Hamsch, S. Oberstedt, R. Capote Noy, P. V. Sedyshev, D. N. Grozdanov, I. Zh. Ivanov, V. Yu. Aleksakhin, E. P. Bogolubov, Yu. N. Barmakov, S. V. Khabarov, A. V. Krasnoperov, *et al.*, Phys. Proc. **64**, 163 (2015).
2. В. М. Быстрицкий, В. Валкович, Д. Н. Грозданов, А. О. Зонтиков, И. Ж. Иванов, Ю. Н. Копач, А. Р. Крылов, Ю. Н. Рогов, И. Н. Русков, М. Г. Сапожников, В. Р. Ской, В. Н. Швецов, Письма в ЭЧАЯ **12**, 486 (2015) [Phys. Part. Nucl. Lett. **12**, 325 (2015)].
3. W. Hauser and H. Feshbach, Phys. Rev. **87**, 366 (1952).
4. V. Yu. Alexakhin, V. M. Bystritsky, N. I. Zamyatin, E. V. Zubarev, A. V. Krasnoperov, V. L. Rapatsky, Yu. N. Rogov, A. B. Sadovsky, A. V. Salamatin, R. A. Salmin, M. G. Sapozhnikov, V. M. Slepnev, S. V. Khabarov, E. A. Razinkov, O. G. Tarasov, and G. M. Nikitin, Nucl. Instrum. Methods A **785**, 9 (2015).
5. U. Waldschlaeger, Spectrochim. Acta B **61**, 1115 (2006).
6. S. Pesenti, G. Nebbia, M. Lunardon, G. Viesti, D. Sudac, K. Nad, S. Blagus, and V. Valković, Nucl. Instrum. Methods A **531**, 657 (2004).
7. V. M. Bystritsky, V. V. Gerasimov, V. G. Kadyshevsky, A. P. Kobzev, A. A. Nozdrin, Yu. N. Rogov, V. L. Rapatsky, A. B. Sadovsky, A. V. Salamatin, M. G. Sapozhnikov, A. N. Sissakian, I. V. Slepnev, V. M. Slepnev, V. A. Utkin, N. A. Zamyatin, A. N. Peredery, *et al.*, Письма в ЭЧАЯ **5**, 743 (2008) [Phys. Part. Nucl. Lett. **5**, 441 (2008)].



**Рис. 6.** Угловое распределение  $\gamma$ -квантов с энергией 6.13 МэВ, образующихся при неупругом рассеянии нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядрах  $^{16}\text{O}$ .

8. В. М. Быстрицкий, Д. Н. Грозданов, А. О. Зонтиков, Ю. Н. Копач, Ю. Н. Рогов, И. Н. Русков, А. Б. Садовский, В. Р. Ской, Ю. Н. Бармаков, Е. П. Боголюбов, В. И. Рыжков, Д. И. Юрков, *Письма в ЭЧАЯ* **13**, 793 (2016) [*Phys. Part. Nucl. Lett.* **13**, 504 (2016)].
9. *Описание ADCM-16*, <http://af.jinr.ru/ADCM16-LTC>
10. J. D. Anderson, C. C. Gardner, J. W. McClure, M. P. Nakada, and C. Wong, *Phys. Rev.* **111**, 572 (1958).
11. J. Benveniste, A. C. Mitchell, C. D. Schrader, and J. H. Zenger, *Nucl. Phys.* **19**, 448 (1960).
12. D. Spaargaren and C. C. Jonker, *Nucl. Phys. A* **161**, 354 (1971).
13. W. J. McDonald, J. M. Robson, and R. Malcolm, *Nucl. Phys.* **75**, 353 (1966).
14. T. Kozłowski, W. Kusch, and J. Wojtkowska, <http://cdf.e.sinp.msu.ru/cgi-bin/exf2htm?LINK=30081004>; T. L. Morgan, J. B. Ashe, and D. O. Nellis, <http://cdf.e.sinp.msu.ru/cgi-bin/exf2htm?-LINK=12695006>

## MEASUREMENT OF THE ANGULAR DISTRIBUTIONS OF GAMMA-QUANTA FROM THE INELASTIC SCATTERING OF 14.1-MeV NEUTRONS BY CARBON AND OXYGEN NUCLEI

**D. N. Grozdanov, N. A. Fedorov, V. M. Bystritski, Yu. N. Kопach, I. N. Ruskov, V. R. Skoy,  
T. Yu. Tretyakova, N. I. Zamyatin, D. Wang, F. A. Aliev, C. Hramco, A. Gandhi, A. Kumar,  
S. Dabylova, E. P. Bogolubov, Yu. N. Barmakov**

The results of the measurements of angular distributions of  $\gamma$  rays from the inelastic scattering of 14.1-MeV neutrons by carbon and oxygen nuclei are presented. The measurements were performed by using the tagged neutron method on a beam of a standard portable neutron generator ING-27. The angular distributions of  $\gamma$  quanta from the states  $4.43(2^+)$  in  $^{12}\text{C}$  and  $6.13(3^-)$  MeV in  $^{16}\text{O}$  were obtained.