

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ НА ЯДРАХ ^{27}Al

© 2019 г. Н. А. Федоров^{1),2)*}, Т. Ю. Третьякова^{1),3)}, В. М. Быстрицкий¹⁾,
Ю. Н. Копач¹⁾, И. Н. Русков^{1),4)}, В. Р. Ской¹⁾, Д. Н. Грозданов^{1),4)},
Н. И. Замятин¹⁾, В. Дунмин^{1),5)}, Ф. А. Алиев^{1),6)}, К. Храмко^{1),7)},
А. Кумар⁸⁾, А. Ганди⁸⁾, С. Дабылова¹⁾, Д. И. Юрков⁹⁾, Ю. Н. Бармаков⁹⁾

Поступила в редакцию 25.12.2018 г.; после доработки 25.12.2018 г.; принята к публикации 25.12.2018 г.

В данной статье представлены результаты измерения угловых и энергетических распределений γ -квантов, образующихся в реакциях неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядрах алюминия ^{27}Al . Измерения проведены с использованием метода меченых нейтронов на пучке порта-тивного нейтронного генератора ИНГ-27. Получены угловые распределения γ -квантов, испускаемых из состояний 844 кэВ ($1/2^+$), 1015 кэВ ($3/2^+$), 2212 кэВ ($7/2^+$), 3004 кэВ ($9/2^+$) ядер ^{27}Al .

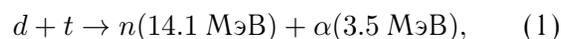
DOI: 10.1134/S0044002719040093

1. ВВЕДЕНИЕ

Основной целью проекта TANGRA (TAGged Neutron and Gamma RAys), выполняемого в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ [1, 2], является детальное изучение рассеяния быстрых нейтронов на атомных ядрах с использованием метода меченых нейтронов. Измерение угловых корреляций ($n-\gamma$) 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 с аналогичной реакцией с протонами, что позволяет исследовать изоспиновую симметрию нуклон-нуклонных взаимодействий. Сильнее всего изоспиновая симметрия проявляется в парах зеркальных ядер, и изотоп ^{27}Al в качестве партнера в изотопическом дублете протон-избыточного ядра ^{27}Si является предметом пристального изучения [4]. С прикладной точки зрения изотоп ^{27}Al очень важен ввиду широкого практического использования алюминия. Интерес к реакции неупругого рассеяния нейтронов на ^{27}Al , как и на ядрах легких и средних по массе элементов, определяется насущной необходимостью уточнения ранее полученных экспериментальных данных, так как эти реакции применяются для экспресс-анализа элементного состава горных пород [5, 6] и сложных химических веществ; для описания цепочек размножения нейтронов в атомной энергетике; при создании приборов для обнаружения скрытых опасных веществ [7, 8].

Метод меченых нейтронов (ММН) основан на регистрации характеристического ядерного γ -излучения, возникающего в результате неупругого взаимодействия нейтронов с ядрами исследуемого вещества, в совпадениях с α -частицами, образующимися в бинарной реакции:



продукты которой в СЦМ разлетаются в противоположных направлениях. Поэтому, зная направление вылета α -частицы, можно восстановить направление вылета нейтрона — “пометить” его.

¹⁾Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия.

²⁾Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Россия.

³⁾Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Россия.

⁴⁾Институт ядерных исследований и ядерной энергетики Болгарской академии наук, София, Болгария.

⁵⁾Сианьский Университет Цзяо Тун, Сиань, Китай.

⁶⁾Институт геологии и геофизики Национальной Академии наук Азербайджана, Баку, Азербайджан.

⁷⁾Институт химии Академии наук Молдовы, Кишинев, Республика Молдова.

⁸⁾Бенаресский индуистский университет, Варанаси, Индия.

⁹⁾ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва, Россия.

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

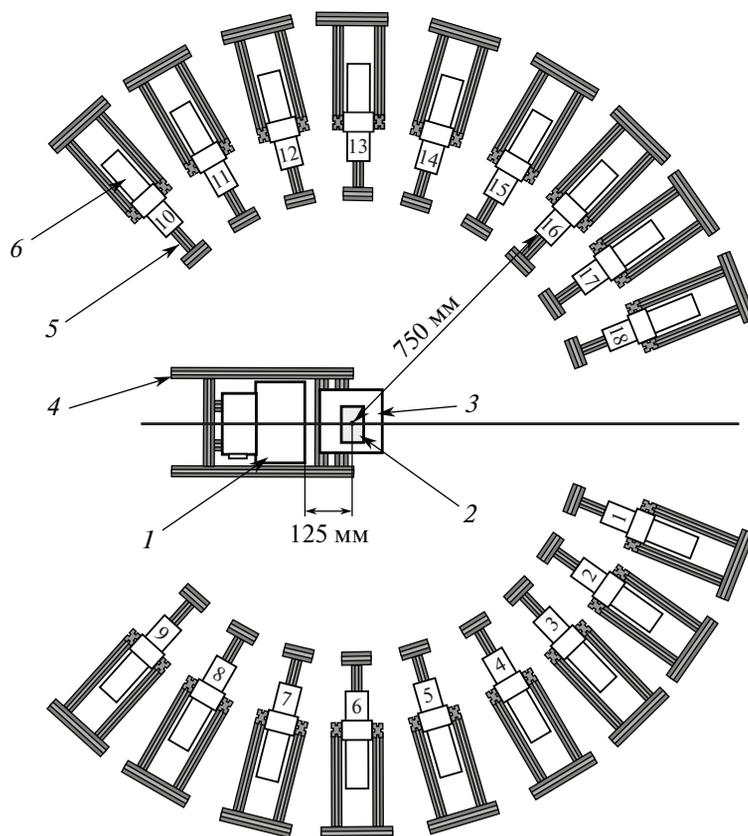


Рис. 1. Схема экспериментальной установки TANGRA: 1 — генератор ИНГ-27, 2 — мишень, 3 — держатель мишени, 4 — алюминиевая рама установки, 5 — подставка для детектора γ -излучения, 6 — детектор γ -излучения.

На практике “мечение” нейтрона осуществляется с помощью позиционно-чувствительного многопиксельного α -детектора, встроенного в нейтронный генератор. Также регистрация α -частиц позволяет определить интенсивность потока меченых нейтронов и реализовать схему (α, γ) -совпадений, что существенно снижает вклад фоновых событий в получаемые γ -спектры. Знание числа меченых нейтронов, падающих на мишень, числа (n, γ) -совпадений, размеров мишени, а также эффективности регистрации γ -квантов характеристического ядерного излучения позволяет корректно определять дифференциальные и полные сечения процессов неупругого рассеяния нейтронов на ядрах исследуемых изотопов с возбуждением определенных ядерных уровней. Важным преимуществом ММН является возможность как мониторинга потока меченых нейтронов, падающих на исследуемый образец (в настоящей постановке эксперимента генерируется 64 независимых пучка меченых нейтронов), так и высокоэффективного подавления вклада фоновых событий в результирующие γ -спектры.

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследований нейтрон-ядерных реакций в ОИЯИ создана установка TANGRA, схема ко-

торой приведена на рис. 1. В качестве источника меченых нейтронов используется портативный нейтронный генератор ИНГ-27, работающий в непрерывном режиме, в котором происходит ускорение дейтронов до энергий 80–100 кэВ и их фокусировка на тритиевой мишени. Максимальная интенсивность потока нейтронов в 4π -геометрии, создаваемого генератором, составляет $5 \times 10^7 \text{ с}^{-1}$. Альфа-частицы с энергией 3.5 МэВ регистрируются встроенным в генератор 64-пиксельным кремниевым детектором с размерами пикселя $6 \times 6 \text{ мм}^2$, расположенным на расстоянии 100 мм от тритиевой мишени. Для регистрации γ -квантов используются 18 сцинтилляционных детекторов на основе кристаллов ВГО диаметром 76 мм и толщиной 65 мм. Детекторы γ -квантов расположены в горизонтальной плоскости по окружности радиусом 750 мм с шагом по углу 14° . В отличие от предыдущей версии установки [9], в данной конфигурации отсутствует дополнительная пассивная коллимация нейтронного пучка, падающего на облучаемый нейтронами образец, что позволяет сократить расстояние от мишени нейтронного генератора до центра исследуемого образца до 169 мм и эффективно использовать большее число меченых пучков. Отбор событий, соответствующих

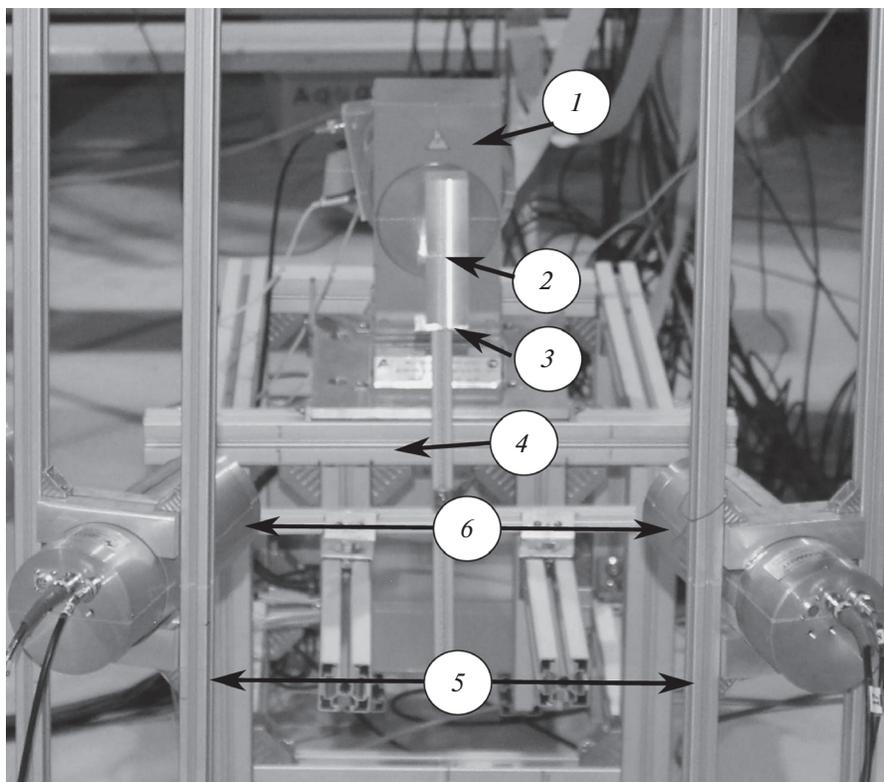


Рис. 2. Образец, установленный на экспериментальной установке. Обозначения такие же, как и на рис. 1.

нейтрон-ядерным реакциям в образце, производится по времени пролета: для построения энергетических спектров отбираются события, лежащие в достаточно узком временном интервале, начало которого задается моментом регистрации α -частицы многопиксельным α -детектором нейтронного генератора. Это позволяет проводить эффективное разделение зарегистрированных γ -детектором γ -квантов и нейтронов по времени пролета. Для сбора и предварительного анализа данных используется компьютер с двумя АЦП ADCM-16 [10].

Для проведения корректного измерения угловых распределений γ -излучения необходимо оценить влияние поглощения и перерасеяния γ -квантов и нейтронов внутри исследуемого образца. С этой целью методом Монте-Карло было проведено моделирование настоящего эксперимента с образцами различных размеров с использованием GEANT4. В качестве оптимальных размеров образца принимались такие, для которых изменение функции углового распределения γ -квантов (образующихся в реакциях неупругого рассеяния нейтронов на ядрах исследуемых веществ) за счет геометрических параметров образца не превышало бы 10%.

Для определения влияния размеров образца на получаемое угловое распределение использовалась следующая методика:

1. В качестве начальных частиц использовались нейтроны, запускаемые в соответствии с измеренными профилями меченых пучков [11].
2. Взаимодействие нейтронов и γ -квантов с веществом мишени и γ -детекторов описывалось с помощью набора параметров (Physics List) "QGSP_BIC" [12], присутствующего "по умолчанию" в GEANT4.
3. Угловое распределение γ -излучения, возникающего при взаимодействии нейтронов с веществом образца, генерируемое GEANT4, искусственно заменялось на изотропное.

В результате проведенного моделирования было установлено, что образец $4 \times 4 \times 14 \text{ см}^3$ дает достаточно малый вклад в анизотропию, и поэтому эксперимент проводился с использованием образца именно такого размера. Фотография установки с установленным образцом приведена на рис. 2.

3. ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Сигналы, поступающие с α - и γ -детекторов установки, оцифровываются с помощью ADCM и записываются на жесткий диск компьютера, после

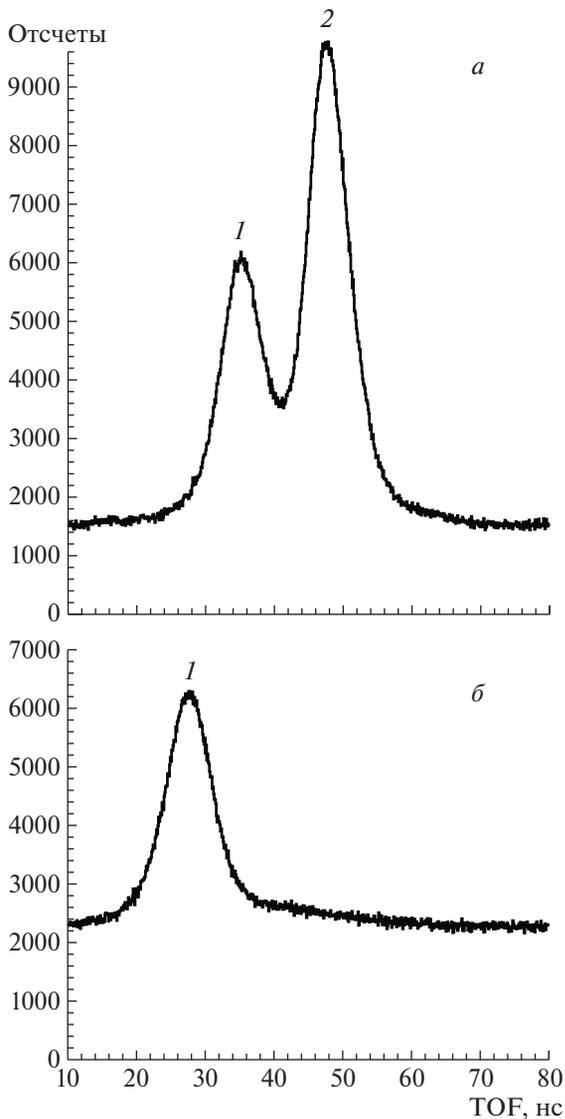


Рис. 3. Временные спектры для детекторов № 1 (а) и 6 (б). На обоих спектрах пик 1 соответствует γ -квантам, пик 2 на спектре (а) — нейтронам.

чего происходит их анализ путем построения временных и амплитудных спектров событий с разделением зарегистрированных нейтронов и γ -квантов по времени пролета.

Как видно на рис. 3, во временном распределении наблюдаются два пика: пик 1, обусловленный регистрацией характеристического γ -излучения ядра ^{27}Al , и пик 2, соответствующий регистрации нейтронов, попавших в детектор. Загрузка детектора № 1 прямыми мечеными нейтронами существенно больше, чем детектора № 6, так как он расположен вне зоны распространения пучков меченых нейтронов, и поэтому на временном спектре событий с детектора № 6 пик, соответствующий нейтронам, отсутствует.

Для событий, попадающих во временное окно, соответствующее регистрации γ -квантов, строятся энергетические спектры. В отличие от нашей предыдущей работы [13], в которой в качестве источника старт-сигналов использовалась матрица 6×6 пикселей α -детектора, в настоящем эксперименте использовались сигналы со всех пикселей, принадлежащих четырем ближайшим к оси системы вертикальным стрипам (X -стрипам). Данное решение было продиктовано двумя обстоятельствами. Во-первых, геометрические размеры образца ограничены: взаимодействие гамма-квантов и нейтронов с веществом образца не должно вносить существенного искажения в наблюдаемую анизотропию γ -излучения. Во-вторых, детекторы γ -квантов расположены в горизонтальной плоскости и угол между направлением вылета γ -кванта, зарегистрированного детектором, и направлением меченого нейтронного пучка слабо зависит от вертикальной координаты пикселя на стрипе. Последнее обстоятельство позволило сгруппировать все пиксели на вертикальных стрипах, и при дальнейшей обработке использовались комбинации X -стрип- γ -детектор.

Из полученных энергетических спектров извлекается информация о числе событий, соответствующих излучению γ -квантов при переходе ядра из определенного возбужденного состояния в состояние с меньшей энергией возбуждения. Обычно учитываются только события, лежащие в пределах пика, соответствующего полному поглощению энергии γ -кванта веществом детектора, либо пика одиночного вылета.

Энергетическое разрешение ВГО γ -детекторов ($\approx 10.4\%$ при $E_\gamma = 662$ кэВ) не позволяет точно идентифицировать пики на энергетических спектрах, поэтому был проведен аналогичный эксперимент с использованием HPGe-детектора, обладающего существенно лучшим энергетическим разрешением ($\approx 3.4\%$ при $E_\gamma = 662$ кэВ). Сравнение энергетических спектров, полученных с использованием ВГО- и HPGe-детекторов, приведено на рис. 4. Из-за того, что энергетическое разрешение детекторов ВГО приводит к значительному уширению пиков, надежно идентифицировать и, соответственно, получить результаты по угловому распределению γ -квантов, представляется возможным лишь для основных, наиболее интенсивных, переходов. На рис. 4 подписаны энергии γ -квантов для соответствующих пиков.

Для количественного описания анизотропии углового распределения γ -квантов вводится параметр анизотропии $W(\theta)$. Экспериментально полученные угловые распределения γ -квантов аппроксимируются разложением по полиномам Ле-

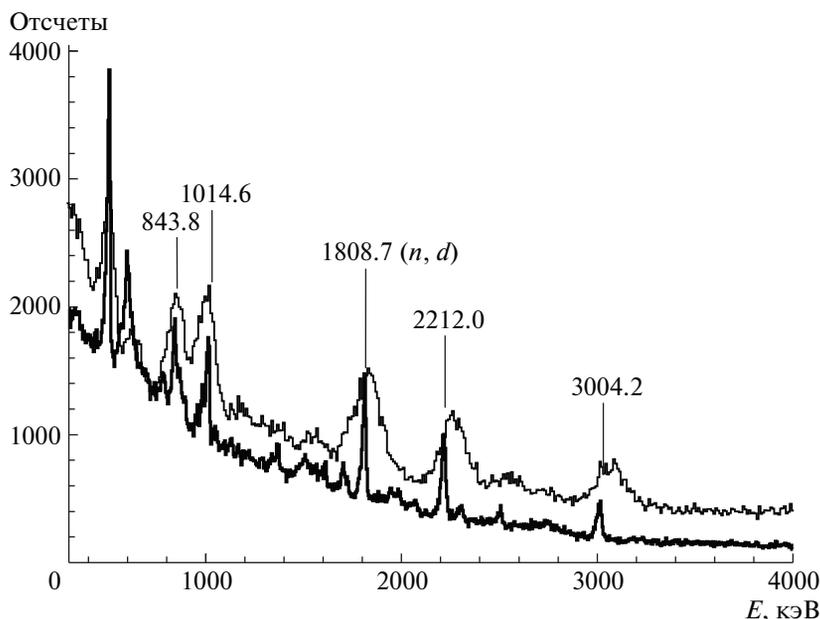


Рис. 4. Энергетические спектры, измеренные с помощью BGO-детектора (тонкая кривая) и HPGe-детектора (жирная кривая). Указаны значения энергии (кэВ) для наиболее интенсивных пиков на спектрах с BGO-детектора.

жандра:

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

где a_i — коэффициенты разложения, J — мультипольность γ -перехода, индекс суммирования i принимает только четные значения.

Информация о количестве событий, соответствующих каждому из γ -переходов, нуждается в корректировке из-за поглощения и перерассеяния γ -квантов в образце. Конечная угловая анизотропия определялась по следующей формуле:

$$W(\theta) = \frac{W_{\text{exp}}(\theta)}{K(\theta)}. \quad (3)$$

Здесь $K(\theta)$ — зависимости нормированного коэффициента ослабления потока γ -квантов от номера детектора для каждого стрипа. Значения коэффициента ослабления были получены в результате расчетов с использованием GEANT4 по методике, описанной выше. В качестве примера на рис. 5 приведены коэффициенты ослабления потока γ -квантов для стрипов № 3 и № 4. Видно, что взаимодействие гамма-квантов и нейтронов с веществом образца может существенно исказить наблюдаемое угловое распределение в случае, если меченый пучок не проходит через центр образца (в данном случае пучок № 3 проходит через центр образца, а пучок № 4 — нет).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

В эксперименте с использованием HPGe-детектора наблюдалось 18 γ -переходов, соответствующих реакциям (n, n') , (n, p) , (n, d) на ^{27}Al . Энергии γ -квантов и реакции, в ходе которых

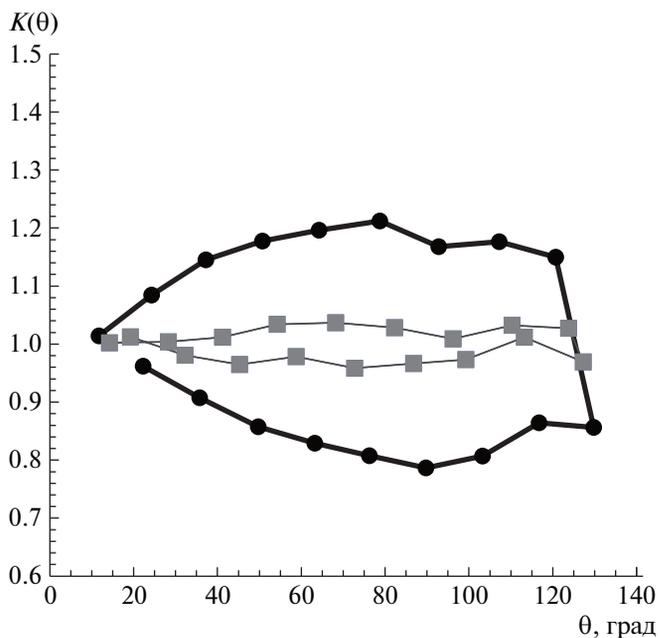


Рис. 5. Корректировочные коэффициенты $K(\theta)$ для стрипов № 4 (жирная кривая, круглые точки) и № 3 (тонкая кривая, квадратные точки). Точки соответствуют отдельным BGO-детекторам.

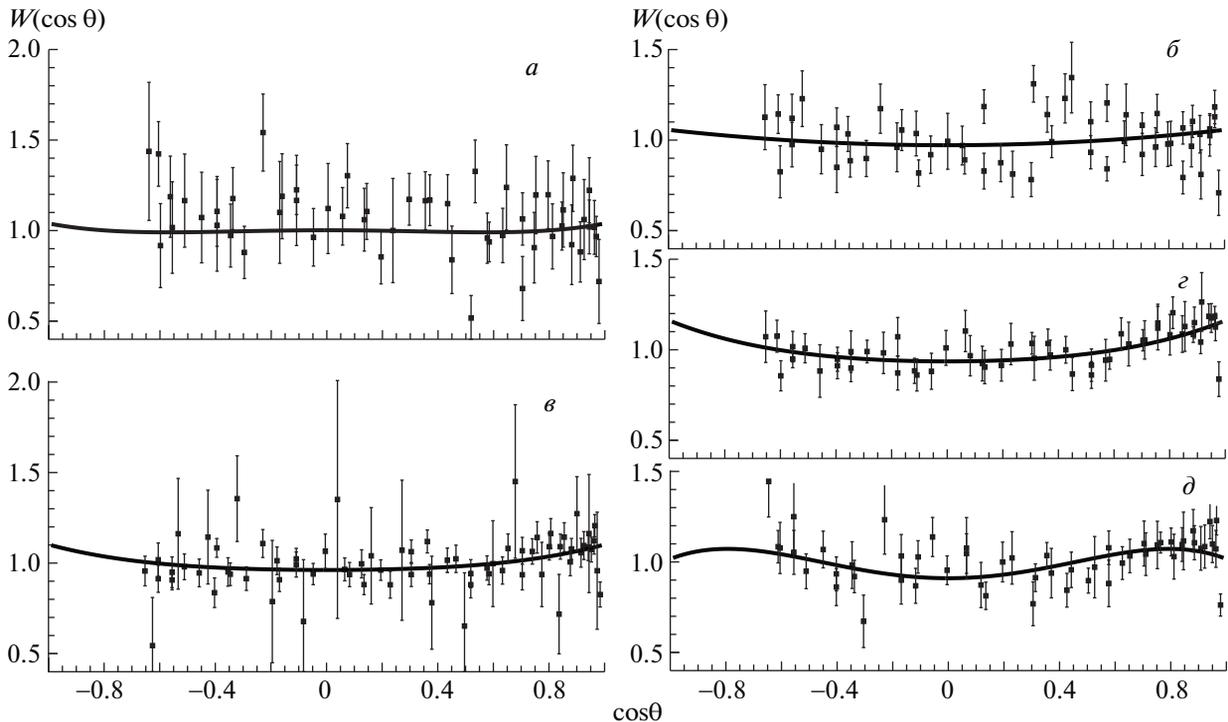


Рис. 6. Угловое распределение γ -квантов, испущенных в реакции рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядрах ^{27}Al с возбуждением уровня 844 кэВ (реакция (n, n')) (а), уровня 1015 кэВ (реакция (n, n')) (б), уровня 1809 кэВ (реакция (n, d)) (в), а также уровней 2212 кэВ (з) и 3004 кэВ (д) (реакция (n, n')).

они были испущены, приведены в табл. 1. Ранее наиболее полный спектр γ -излучения в реакции $^{27}\text{Al}(n, x\gamma)$ с энергией нейтронов 14.9 МэВ был получен в работе [14], также в ней были определены дифференциальные сечения 26 дискретных линий в диапазоне энергий E_γ от 90 до 3005 кэВ при трех фиксированных значениях угла рассеяния, семь из которых относятся к реакции $^{27}\text{Al}(n, n')^{27}\text{Al}$. По сравнению со списком работы [14], в нашем эксперименте были определены все переходы, относящиеся к реакции (n, n') , а также большинство γ -переходов из реакций (n, p) и (n, d) . Дополнительно в нашем эксперименте были идентифицированы линии с $E_\gamma = 1506, 3203$ и 4580 кэВ, соответствующие переходам $11/2^+(4510 \text{ кэВ}) \rightarrow 9/2^+(3004 \text{ кэВ})$, $1/2^-(4054 \text{ кэВ}) \rightarrow 1/2^+(844 \text{ кэВ})$ и $7/2^+(4580 \text{ кэВ}) \rightarrow 5/2^+(\text{осн. сост.})$ в ^{27}Al .

Угловое распределение γ -квантов было получено для четырех наиболее интенсивных линий, относящихся к реакции $^{27}\text{Al}(n, n')$, с энергиями $E_\gamma = 846, 1015, 2212$ и 3004 кэВ. Также были получены данные по угловому распределению γ -квантов из реакции $^{27}\text{Al}(n, d)^{26}\text{Mg}$ $E_\gamma = 1809$ кэВ. Несмотря на большое количество проведенных ранее экспериментов по измерению сечений γ -квантов в реакции $^{27}\text{Al}(n, n')^{27}\text{Al}$ при энергии ней-

тронов 14 МэВ [14–17], нам не удалось найти в базах данных информацию об угловых распределениях испускаемых γ -квантов. Приведенные в работе [18] угловые распределения были получены при энергии нейтронов $E_n = 3.5$ МэВ. Выраженная анизотропия наблюдалась для γ -квантов с энергией 2212 и 3004 кэВ и составила около 20%.

Угловые распределения γ -квантов, полученные в нашем эксперименте, имеют сходный характер. На рис. 6 приведены экспериментальные значения и аналитическая аппроксимация по полиномам Лежандра для параметра анизотропии $W(\cos \theta)$ (2), полученные в результате анализа событий, лежащих в пределах пика полного поглощения. Коэффициенты a_i приведены в табл. 2 в сравнении с модельными оценками, полученными нами в подходе в рамках модели составного ядра по формулам из [19]. Если переход происходит из состояния со спином, имеющим меньшее значение, чем спин основного состояния, распределение γ -квантов должно иметь весьма малую анизотропию. Соответственно, для переходов $E_\gamma = 846$ кэВ ($1/2^+$) и 1015 кэВ ($3/2^+$) как результаты эксперимента, так и модельные оценки соответствуют изотропному распределению. Изотропность излучения γ -квантов с энергией 846 кэВ, наблюдаемая в эксперименте, подтверждается модельными оценками, и поэтому может служить критерием

Таблица 1. Гамма-переходы, наблюдавшиеся в эксперименте (для каждого перехода указана энергия γ -кванта E_γ (кэВ), соответствующая реакция активации, а также энергии, спины и четности начального E_i (кэВ), J_i^P и конечного E_f (кэВ), J_f^P состояний; жирным шрифтом выделены переходы, для которых определены угловые распределения)

E_γ	Реакция	E, J_i^P	E, J_f^P
472	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	472(1 ⁺)	0(4 ⁺)
792	$^{27}\text{Al}(n, n')^{27}\text{Al}$	3004(9/2 ⁺)	2211(7/2 ⁺)
844	$^{27}\text{Al}(n, n')^{27}\text{Al}$	844(1/2⁺)	0(5/2⁺)
874	$^{27}\text{Al}(n, a)^{24}\text{Na}$	1346(1 ⁺)	472(1 ⁺)
985	$^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$	985(3/2 ⁺)	0(1/2 ⁺)
1014	$^{27}\text{Al}(n, n')^{27}\text{Al}$	1014(3/2⁺)	0(5/2⁺)
1506	$^{27}\text{Al}(n, n')^{27}\text{Al}$	4510(11/2 ⁺)	3004(9/2 ⁺)
1698	$^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$	1698(5/2 ⁺)	0(1/2 ⁺)
1720	$^{27}\text{Al}(n, n')^{27}\text{Al}$	2735(5/2 ⁺)	1014(3/2 ⁺)
1809	$^{27}\text{Al}(n, d)^{26}\text{Mg}$	1809(2⁺)	0(0⁺)
1940	$^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$	1940(5/2 ⁺)	0(1/2 ⁺)
2063	$^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$	3761(5/2 ⁻ , 7/2 ⁻)	1699(5/2 ⁺)
2211	$^{27}\text{Al}(n, n')^{27}\text{Al}$	2211(7/2⁺)	0(1/2⁺)
2298	$^{27}\text{Al}(n, n')^{27}\text{Al}$	4510(11/2 ⁺)	2211(7/2 ⁺)
2506	$^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$	3491(3/2 ⁺ , 5/2 ⁺)	985(3/2 ⁺)
3004	$^{27}\text{Al}(n, n')^{27}\text{Al}$	3004(9/2⁺)	0(1/2⁺)
3203	$^{27}\text{Al}(n, n')^{27}\text{Al}$	4054(1/2 ⁻)	844(1/2 ⁺)
4580	$^{27}\text{Al}(n, n')^{27}\text{Al}$	4580(7/2 ⁺)	0(5/2 ⁺)

Таблица 2. Коэффициенты разложения по полиномам Лежандра для анизотропии углового распределения γ -излучения, полученные при аппроксимации экспериментальных данных (эксперимент) и в модельных расчетах (расчет)

E_γ , кэВ	Эксперимент		Расчет	
	a_2	a_4	$a_{2\text{th}}$	$a_{4\text{th}}$
845	0.015 ± 0.2	0.05 ± 0.2	0	0
1015	0.06 ± 0.03		-0.015	
1805	0.09 ± 0.03	0.02 ± 0.03	-	-
2215	0.14 ± 0.02	0.02 ± 0.03	0.09	0
3005	0.11 ± 0.03	-0.09 ± 0.04	0.17	0.0013

корректности обработки экспериментальных данных. Переходы с $E_\gamma = 1015$ и 2212 кэВ имеют смешанную мультипольность $M1 + E2$, что затрудняет расчет их анизотропии. В расчетах, приведенных в настоящей работе, мультипольность γ -квантов с энергией 1015 кэВ предполагалась равной $M1$, а

γ -квантов с энергией 2212 кэВ — $E2$. Выраженная анизотропия переходов 2212 и 3004 кэВ составляет около 20%, при этом экспериментальные результаты и модельные оценки хорошо согласуются между собой.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На установке TANGRA с использованием метода меченых нейтронов на пучке портативного нейтронного генератора ИНГ-27 проведено исследование реакции неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядрах алюминия. В анализ были включены данные нескольких меченых пучков, что позволило улучшить статистические условия эксперимента и измерить анизотропию γ -излучения с хорошим пространственным разрешением. Тем не менее процедура обработки данных все еще нуждается в улучшении, в частности, использование функции отклика детекторов позволит определять площади пиков на энергетических спектрах с большей точностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. Ruskov, Yu. N. Kopatch, V. M. Bystritsky, V. Skoy, V. Shvetsov, F.-J. Hamsch, S. Oberstedt, R. Capote, P. V. Sedyshev, D. Grozdanov, I. Zh. Ivanov, V. Yu. Aleksakhin, E. P. Bogolubov, Yu. N. Barmakov, S. V. Khabarov, A. V. Krasnoperov, *et al.*, Phys. Procedia **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. G. Lotay, P. J. Woods, D. Seweryniak, M. P. Carpenter, H. M. David, R. V. F. Janssens, and S. Zhu, Phys. Rev. C **84**, 035802 (2011).
5. V. Yu. Alexakhin, V. M. Bystritsky, N. I. Zamyatin, E. V. Zubarev, A. V. Krasnoperov, V. L. Rapatskiy, 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 Phys. Res. Sect. A **785**, 9 (2015).
6. U. Waldschlaeger, Spectrochim. Acta B **61**, 1115 (2006).
7. S. Pesente, G. Nebbia, M. Lunardon, G. Viesti, D. Sudac, K. Nad, S. Blagus, and V. Valkovic, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A **531**, 657 (2004).
8. 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. Perebery, *et al.*, Письма в ЭЧАЯ **5**, 743 (2008) [Phys. Part. Nucl. Lett. **5**, 441 (2008)].
9. 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)].
 10. *Описание ADCM-16*, <http://afi.jinr.ru/ADCM16-LTC>
 11. N. I. Zamyatin, V. M. Bystritsky, Y. N. Kopach, *et al.* (TANGRA Collab.), Nucl. Instrum. Methods Res. Sect. A **898**, 46 (2018).
 12. *Reference Physics Lists*, <https://geant4.web.cern.ch/node/155>
 13. Д. Н. Грозданов, Н. А. Федоров, В. М. Быстрицкий, Ю. Н. Копач, И. Н. Русков, В. Р. Ской, Т. Ю. Третьякова, Н. И. Замятин, Д. Ван, Ф. А. Алиев, К. Храмо, А. Ганди, А. Кумар, С. Дабылова, Е. П. Боголюбов, Ю. Н. Бармаков, ЯФ **81**, 548 (2018) [Phys. At. Nucl. **81**, 588 (2018)].
 14. H. Zhou and G. Huang, Nucl. Sci. Engin. **125**, 61 (1997).
 15. S. P. Simakov, A. Pavlik, H. Vonach, and S. Hlavac, INDC(ССР)-413, IAEA NDS (Vienna, 1998).
 16. S. Hlavac, L. Dostal, I. Turzo, A. Pavlik, and H. Vonach, Nucl. Sci. Engin. **125**, 196 (1997).
 17. F. C. Engesser and W. E. Thompson, J. Nucl. Energy **21**, 487 (1967).
 18. K. C. Chung, D. E. Velkley, J. D. Brandenberger, and M. T. McEllistrem, Nucl. Phys. A **115**, 476 (1968).
 19. E. Sheldon and P. Gantenbein, Z. Phys. **18**, 397 (1967).

INVESTIGATION OF THE NEUTRON INELASTIC SCATTERING ON ^{27}Al

**N. A. Fedorov^{1),2)}, T. Yu. Tretyakova^{1),3)}, Yu. N. Kopatch¹⁾, D. N. Grozdanov^{1),4)},
V. M. Bystritsky¹⁾, I. N. Ruskov⁴⁾, V. R. Skoy¹⁾, N. I. Zamyatin¹⁾, W. Dongming^{1),5)},
F. A. Aliev^{1),6)}, K. Hramco^{1),7)}, A. Kumar^{1),8)}, A. Gandhi^{1),8)},
S. Dabylova¹⁾, D. I. Yurkov⁹⁾, and Yu. N. Barmakov⁹⁾**

¹⁾Joint Institute for Nuclear Research, Dubna

²⁾Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³⁾Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁴⁾Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy of the Bulgarian Academy of Sciences,
Soŭia, Bulgaria

⁵⁾Xian Jiaotong University, Xian, China

⁶⁾Institute of Geology and Geophysics Azerbaijan National Academy of Sciences,
Baku, Azerbaijan

⁷⁾Institute of Chemistry of Moldova Academy of Science, Kishinev, Moldova

⁸⁾Banaras Hindu University, Varanasi, India

⁹⁾Dukhov All-Russia Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

In this article the results of the angular and energetic distributions of the gamma-quanta emitted via neutron inelastic scattering on ^{27}Al measurements are presented. The measurements were performed using compact neutron generator ING-27 as a tagged neutron source. The angular distributions for gamma quanta emitted from states 844 keV ($1/2^+$), 1015 keV ($3/2^+$), 2212 keV ($7/2^+$), 3004 keV ($9/2^+$) are obtained.