

ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДВУХНЕЙТРОННЫХ СОБЫТИЙ В 3D НЕЙТРОННОМ ДЕТЕКТОРЕ

*С. В. Афанасьев^а, А. В. Ставинский^{а,б}, П. Н. Алексеев^{а,б},
Д. К. Дряблов^а, Н. М. Жигарева^б, Д. Г. Сакулин^{а,б, 1}*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

^б Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

Описана процедура разделения одно- и двухнейтронных событий по числу активных ячеек, количеству и форме кластеров. Такая процедура эффективна даже в случае одинаковых энергий нейтронов, когда критерии, основанные на времяпролетной информации, неприменимы. Представлены результаты моделирования методом Монте-Карло с библиотекой Geant4 взаимодействия одиночных и парных нейтронов с энергиями от 0,5 до 4 ГэВ в объеме 16-слойного нейтронного детектора.

The procedure for separating one- and two-neutron events by the number of active cells, the number and shape of clusters is described. This procedure is effective even in the case of identical neutron energies, when criteria based on time-of-flight information are not applicable. The results of Monte Carlo simulation with the Geant4 toolkit of the interaction of single and double neutrons with energies from 0.5 to 4 GeV in the 16-layer neutron detector are presented.

PACS: 29.40.Mc; 02.50.Ng

ВВЕДЕНИЕ

На создаваемых и планируемых установках ускорительного комплекса Нуклотрон–NICA SPD [1], BM@N [2] предполагается проводить регистрацию и спектрометрию потоков нейтронов с энергией от нескольких сотен МэВ до нескольких ГэВ на принципиально новом уровне. На основе прогресса в технологиях SiPM создаются детекторы, имеющие 3D-структуру и, по количеству собираемой информации о детектируемом нейтроне, являющиеся промежуточными между стандартными нейтронными счетчиками и трековыми детекторами заряженных частиц. Такие приборы позволяют восстанавливать пространственную картину взаимодействия на качественно новом уровне. В идейном смысле среди детекторов такого типа следует указать на детекторы, разрабатывавшиеся для проекта CALICE [3].

¹E-mail: sakulin@jinr.ru

Нейтроны, образующиеся в области центральных быстрот, — это наиболее интересные и перспективные объекты исследований в энергетическом диапазоне, практически не закрытом существующими нейтронными детекторами. Используемые в этой области энергий нейтронные детекторы либо ориентированы на идентификацию сравнительно малоэнергичных нейтронов (до 300 МэВ), например SCAN [4] или TOF Neutron Spectrometer [5], либо рассчитаны на регистрацию одиночных нейтронов, либо на то, где не требуется большой аксептанс (например, нейтроны-спектрометры налетающего ядра в узком угловом диапазоне NeuLAND [6]).

Вследствие отсутствия заряда регистрация нейтронов выполняется по вторичным продуктам реакции нейтронов с веществом детектора. Эффективность регистрации зависит от вероятности возникновения ядерной реакции и определяется толщиной детектора, обычно выражаемой в ядерных длинах (λ). Отсюда следует, что нейтронный детектор должен иметь достаточно большое количество вещества и что результат взаимодействия сильно флуктуирует.

Для того, чтобы создаваемые детекторы смогли полностью реализовать свой потенциал, — не только регистрировать, но и сепарировать взаимодействия, принадлежащие разным нейтронам, — необходимо развивать эффективные алгоритмы анализа собираемой информации. При некоторых специфических особенностях этих алгоритмов, зависящих от конкретных условий экспериментов (оптимальной гранулярности детектора, временного разрешения, внешнего окружения и т. п.), наиболее существенные черты этих алгоритмов диктуются особенностями взаимодействия нейтронов с веществом и носят универсальный характер.

В представляемой статье рассмотрены топологические критерии разделения событий с одиночным нейтроном и событий с двумя нейтронами. Эти критерии особенно ценны тем, что остаются эффективными для разделения одно- и двухнейтронных событий даже в случае, когда нейтроны имеют близкие импульсы и, следовательно, не могут быть разделены ни по времени пролета, ни по поперечным координатам сработавших ячеек детектора. Использовался генератор одиночных и парных нейтронов с энергиями 0,5, 1, 2 и 4 ГэВ и модель GEANT 16-слойного нейтронного детектора, расположенного на расстоянии 5 м от источника нейтронов. Детектор состоит из 16 чередующихся активных слоев со 121 ячейкой, сгруппированных в матрицу размером 11×11 . Ячейки состоят из пластиковых сцинтилляторов размером $4 \times 4 \times 2,5$ см и пластин поглотителя, каждая размером $44 \times 44 \times 3$ см, установленных на общей опорной раме. Общая длина HGND составляет около 1 м, что соответствует примерно 3 длинам ядерного взаимодействия.

КРИТЕРИИ РАЗДЕЛЕНИЯ ОДНО- И ДВУХНЕЙТРОННЫХ СОБЫТИЙ ПО ЧИСЛУ АКТИВНЫХ ЯЧЕЕК, КОЛИЧЕСТВУ И ФОРМЕ КЛАСТЕРОВ

С помощью генератора формировался поток нейтронов, равномерно падающих на переднюю поверхность детектора. Если в объеме детектора происходили ядерные реакции, то продукты реакции, теряющие энергию в активных элементах (ячейках) детектора, считались зарегистрированными, если эти потери превышали 3 МэВ. Кроме того, если сработавших ячеек в событии было несколько и они примыкали друг к другу, то такую группу считали следствием одной реакции с образованием кластера в объеме детектора.

В процессе моделирования было рассмотрено два условия регистрации одного нейтрона:

условие 1: в объеме детектора сработало минимум 2 ячейки;

условие 2: требуется, чтобы сформировался хотя бы один кластер, состоящий из 2 и более ячеек.

Если появлялись отдельные единичные ячейки, то такие ячейки кластером не считались и из дальнейшего анализа исключались.

Пример таких событий представлен на рис. 1. Ячейки, окрашенные в желтый (1) и синий (2) цвета, формируют кластеры. Ячейка зеленого цвета (3) кластером не считалась и из дальнейшего анализа исключалась. На представленном рисунке по осям X и Y отложен номер ячейки в поперечном направлении, а по оси Z — номер слоя по направлению движения нейтрона.

Доля событий, в которых отклик детектора на нейтрон удовлетворял условиям 1 или 2 (предварительная оценка эффективности регистрации нейтрона), получилась различной, заметно пониженной при энергии 1000 МэВ и особенно при 500 МэВ и практически неизменной для интервала 2–4 ГэВ (табл. 1). Это обусловлено тем, что при малых энергиях продукты реакции останавливаются в пассивных слоях детектора и не регистрируются.

Для идентификации нейтронов использовалась информация о количестве активных ячеек и количестве кластеров, образующихся в объеме детектора при взаимодействии одного и двух нейтронов. Результаты моделирования представлены на рис. 2 и 3, основные параметры просуммированы в табл. 2.

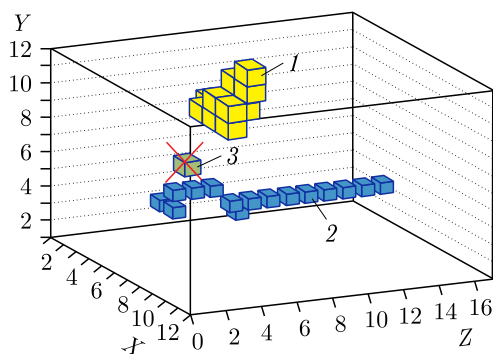


Рис. 1 (цветной в электронной версии). Пример формирования кластеров в событии

Таблица 1. Оценка эффективности регистрации нейтрона

Энергия нейтрона, МэВ	Условие 1, %	Условие 2, %
500	45	34
1000	73	64
2000	85	82
4000	88	88

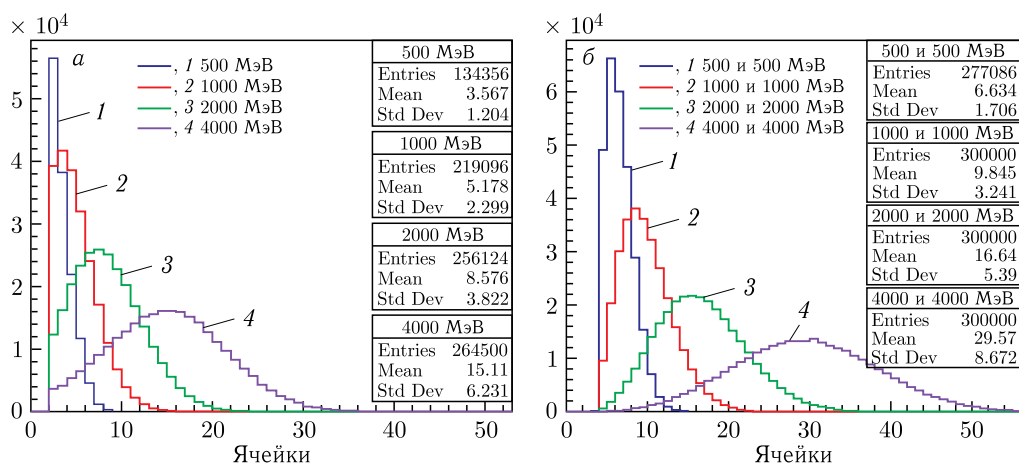


Рис. 2. Распределения по числу активных ячеек при регистрации одного нейтрона (а) и двух нейтронов (б)

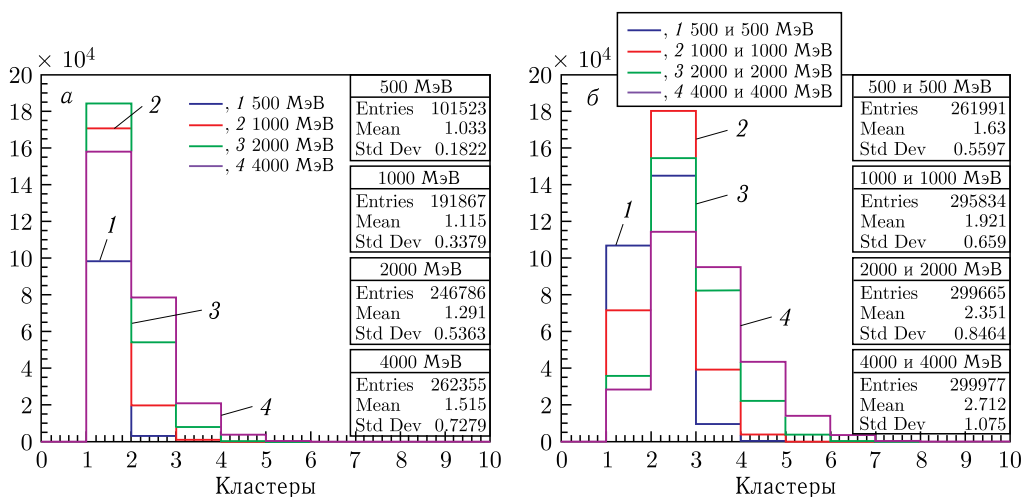


Рис. 3. Распределения по числу кластеров при регистрации одного нейтрона (а) и двух нейтронов (б)

В процессе моделирования рассматривались пары нейтронов с одинаковой энергией как наиболее сложный случай для анализа. В реальном эксперименте два нейтрона неразличимы по энергии, если разница их времени пролета меньше временного разрешения детектора.

Как видно из табл. 2, отношение средних значений числа активных ячеек в событии с одним и двумя нейтронами с хорошей точностью равно числу 2 в прямом соответствии с числом провазимодействовавших нейтронов. Это означает, что гранулярность детектора достаточна для разделения событий с одним и двумя нейтронами. Использование только критерия отбора событий по числу активных ячеек позволяет провести разделение одного и двух нейтронных потоков на уровне 80%. Улучшить

Таблица 2. Среднее число активных ячеек в событии при регистрации одного и двух нейтронов

1 нейтрон			2 нейтрона		
Энергия, ГэВ	Среднее значение	RMS	Энергия, ГэВ	Среднее значение	RMS
0,5	3,07	1,2	0,5 и 0,5	6,13	1,71
1,0	4,68	2,3	1,0 и 1,0	9,35	3,24
2,0	8,08	3,82	2,0 и 2,0	16,14	5,39
4,0	14,61	6,23	4,0 и 4,0	29,13	8,75

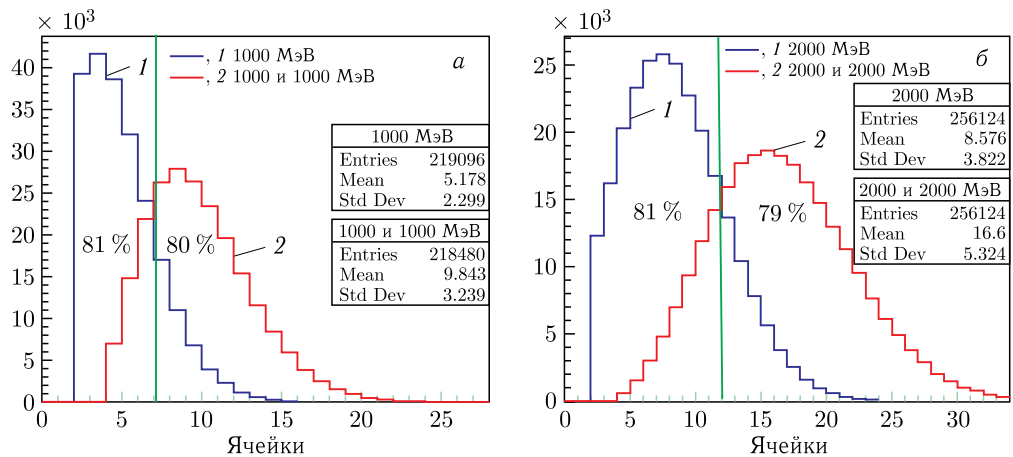


Рис. 4. Перекрывание распределений по множественности ячеек для одно- и двухнейтронных событий. Вертикальная линия дает представление, какая часть событий будет идентифицирована как однонейтронные, а какая — как двухнейтронные

этот результат, используя только этот критерий, невозможно вследствие большой ширины и сильного перекрытия распределений.

В реальном эксперименте интенсивность однонейтронных событий существенно выше двухнейтронных. В таком случае систематическая ошибка идентификации двух нейтронов может достигать более 100%, что неприемлемо для анализа.

Распределения по множественности сработавших ячеек, полученные в результате моделирования, представлены на рис.4. Для наглядности было взято равное количество зарегистрированных одиночных и парных событий. На представленных графиках видно, что распределения перекрываются и около 20 % одно- и двухнейтронных событий будут ложно идентифицированы.

Разделение событий удастся несколько улучшить, используя дополнительно информацию о количестве кластеров, формируемых в объеме детектора. Если провести дополнительный анализ по числу кластеров (рис.5), то можно отметить, что интенсивность одно- (синяя кривая, 1) и двухнейтронных (красная кривая, 2) событий существенно зависит от числа кластеров. На всех графиках энергия нейтронов равна 2 ГэВ.

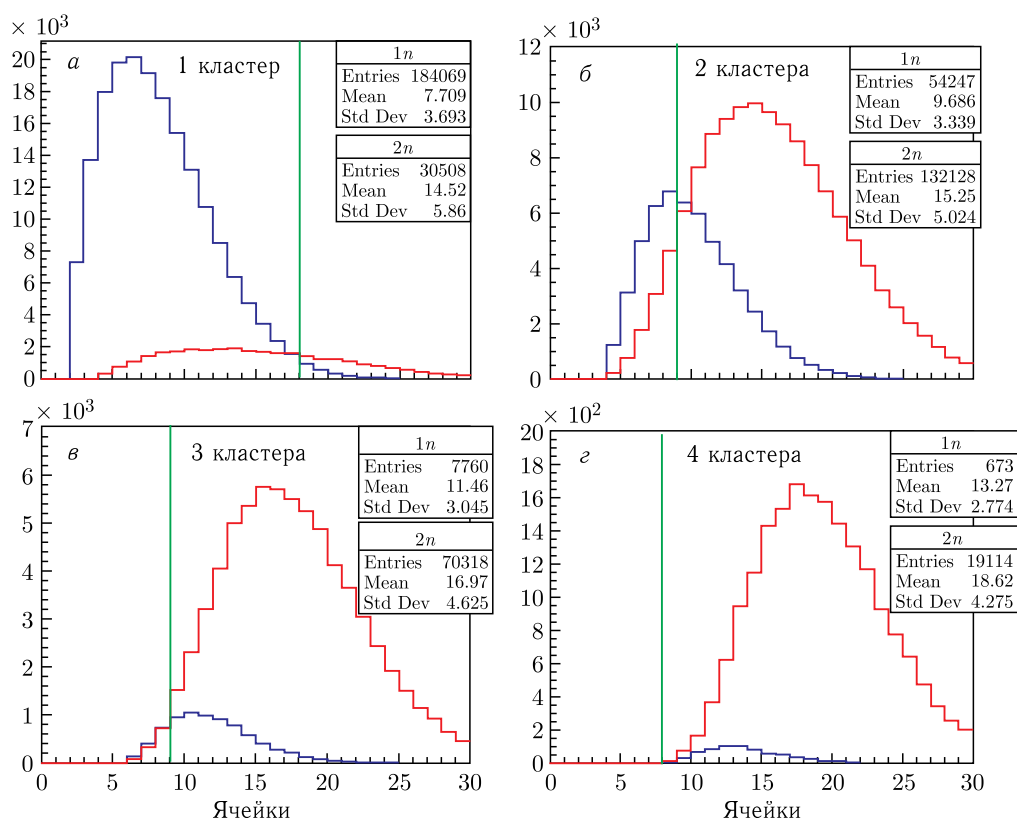


Рис. 5. Перекрывание распределений по множественности ячеек для одно- и двухнейтронных событий для различного количества кластеров

Выбирая границу, разделяющую события с разным числом нейтронов для каждого интервала по множественности кластеров, можно подобрать оптимальные критерии для ячеек и кластеров, приводящие к улучшению сепарации событий. В случае, если число активных ячеек близко к линии разделения одно- и двухнейтронных событий, для более эффективного разделения можно использовать информацию о числе и форме кластеров. Вертикальная прямая на рис. 5 соответствует линии разделения только по критерию числа активных ячеек. Видно, что если число кластеров более двух, то это, скорее всего, двухнейтронное событие.

Более эффективно использовать для разделения одно- и двухнейтронных событий двумерные распределения. На рис. 6 приведены двумерные распределения для одно- и двухнейтронных событий и эффективность идентификации для выбранных критериев отбора, показанных на рисунке красной линией (1).

Такой подход позволяет заметно улучшить качество отбора, доведя эффективность для однеитронных событий до 84 %, а двухнейтронных — до 80 %. Границу разделения нейтронов (красная линия (1) на рис. 6) по множественности можно регулировать, добиваясь оптимального соотношения эффективности сепарирования нейтронов и по-

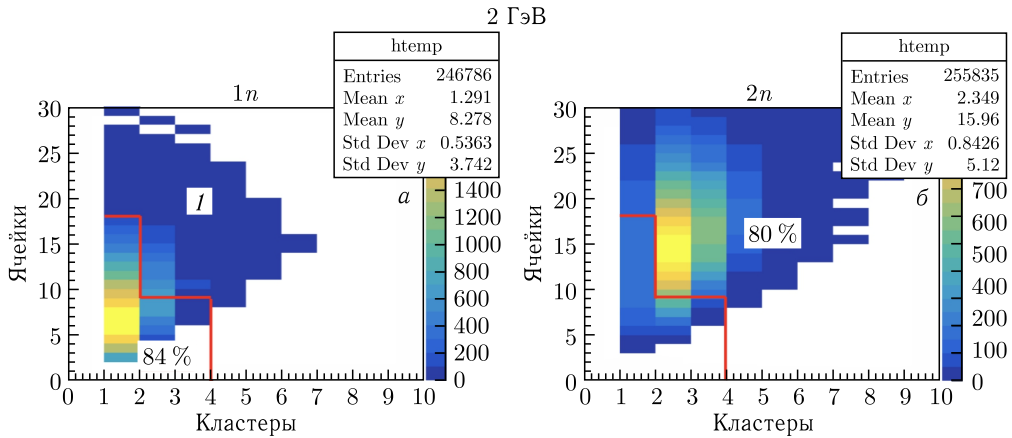


Рис. 6 (цветной в электронной версии). Двумерное распределение сработавших ячеек для одного (а) и двух (б) нейтронов в событии при энергии нейтронов 2 ГэВ

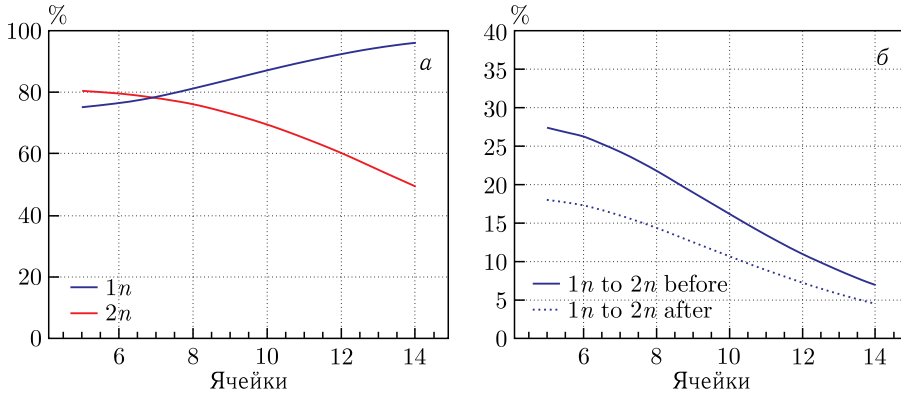


Рис. 7. Влияние условия граничного уровня числа активных ячеек в отборе событий по: а) эффективности идентификации; б) погрешности идентификации двухнейтронных событий (before — без условия, after — с условием)

погрешности идентификации. На рис. 7, а представлена эффективность идентификации нейтронных событий в зависимости от положения граничного уровня числа активных ячеек в двух- и трехкластерных событиях, а также взаимный дополнительный вклад, обусловленный перекрытием распределений на рис. 7, б.

Кроме того, для более качественного отбора можно использовать дополнительную процедуру анализа применительно к области справа от ступенчатой линии на рис. 6.

Между сформированными кластерами можно проанализировать причинно-следственную связь. Кластеры могут считаться инициированными одним нейтроном в случае, если регистрируемый нейтрон может долететь до места формирования второго кластера за время

$$T = T_2 - T_1 \pm \Delta t, \quad (1)$$

где T_1 — время первого кластера; T_2 — время второго кластера, а Δt — погрешность измерения времен, определяемая конструкцией детектора.

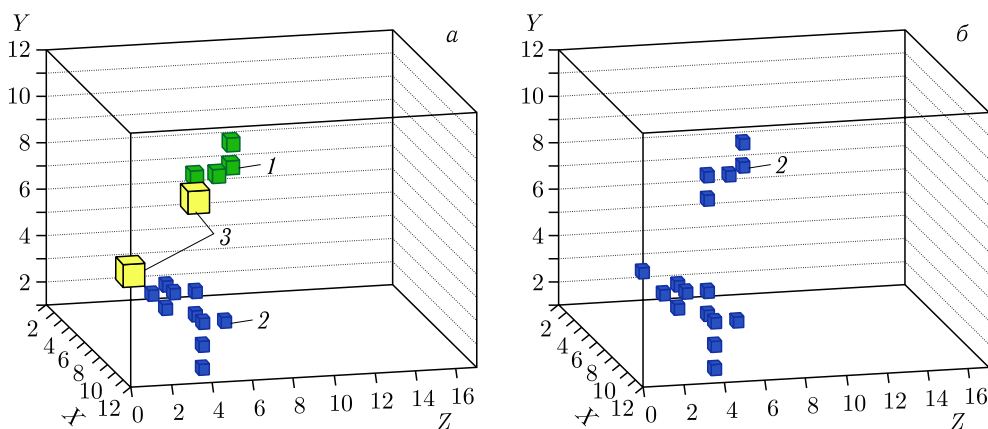


Рис. 8 (цветной в электронной версии). Пример объединения кластеров в результате установления причинно-следственной связи между ними

В случае если равенство (1) выполняется, то можно считать кластеры зависимыми, сформированными одним нейтроном, и их можно объединить в один кластер. В противном случае кластеры считаются сформированными независимыми нейтронами.

Пример работы описанного алгоритма приведен на рис. 8. На рис. 8, *a* выделены два кластера, отмеченные зеленым (1) и синим (2) цветами, являющиеся продуктами взаимодействия одного нейтрона с энергией 4 ГэВ. В каждом кластере найдена ячейка с минимальным временем. Эти ячейки отмечены желтым (3) цветом. Между этими ячейками проведен анализ на предмет их зависимости. Результат анализа удовлетворил условию (1), и оба кластера были объединены в один логический кластер.

Кроме того, если оба кластера возникли в однеитронном событии, то их поперечные импульсы должны быть скомпенсированы, что должно отражаться на пространственной конфигурации кластеров (см. рис. 8). Необходимость использования перечисленных и других дополнительных критериев разделения зависит от конкретных условий эксперимента (множественности нейтронов, интенсивности фоновых загрузок и т. п.).

Применение описанной выше процедуры к области локализации двухнейтронного события (см. рис. 6, *a*) показало следующие результаты: количество кластеров, образованных одним нейтроном и попадающих в область 1, удалось объединить более чем в 50% случаев. В то же время объединение кластеров, сформированных в двухнейтронном событии, уменьшилось незначительно. Результаты проведенного объединения кластеров показаны на рис. 9. В результате объединения эффективность идентификации однеитронного события возросла до 92%, а двухнейтронного, хоть и немного, уменьшилась до 65%, но при этом существенно улучшилось качество идентификации. Оценочное значение систематической ошибки в двухнейтронном событии по сравнению с однеитронным снизилось до 12%, что является вполне приемлемым для анализа.

Представленный выше алгоритм анализа данных приобретает особую актуальность в случае регистрации одно- и двухнейтронных событий с существенно разной

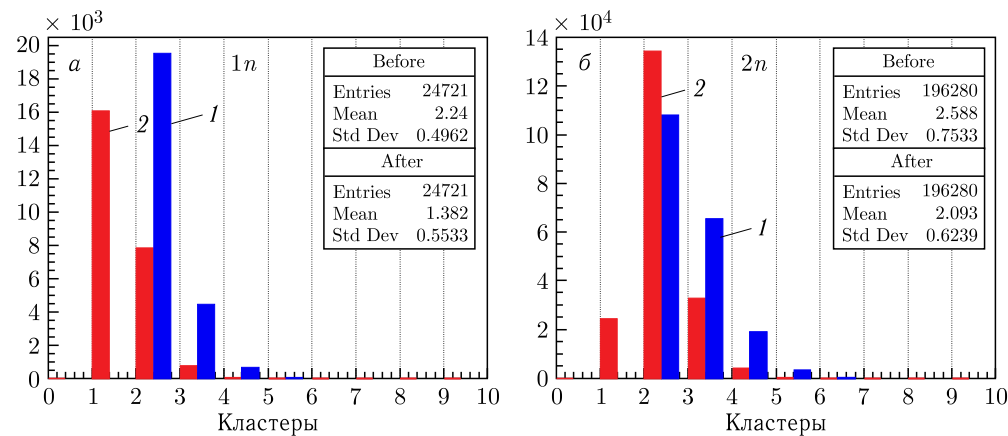


Рис. 9 (цветной в электронной версии). Результат применения процедуры объединения кластеров: а) от одного нейтрона; б) для двух нейтронов. Синяя гистограмма (1) на обоих рисунках — до объединения; красная (2) — после объединения

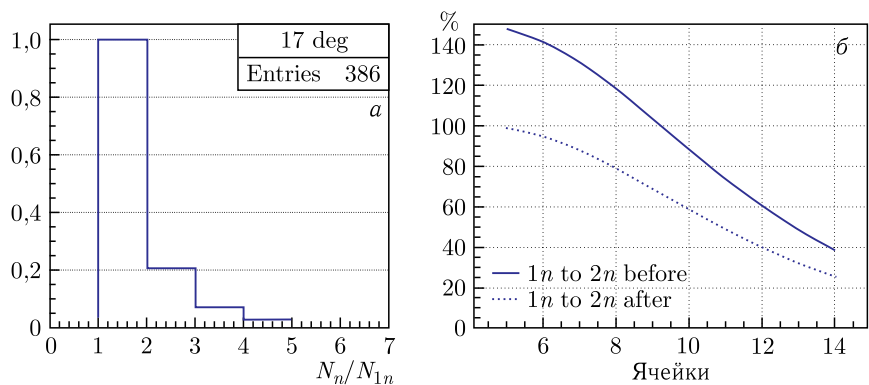


Рис. 10. а) Отношение количества двух- и трехнейтронных событий к однонейтронным в положении детектора под углом 17° ; б) изменение погрешности от однонейтронных событий в идентификацию двухнейтронных (before — без условия, after — с условием)

частотой. Для примера было сделано моделирование нейтронных потоков на поверхность детектора площадью 44×44 см, расположенного под углом 17° на расстоянии 5 м от мишени. Для оценки соотношения применялся генератор DCM-QGSM-SMM в реакции $\text{Xe} + \text{CsI}$ с энергией 3,8 ГэВ/нуклон и прицельным параметром до 10%. Распределение вероятности по множественности нейтронов представлено на рис. 10, а. За 100% бралась частота однонейтронных событий. Вследствие разной интенсивности однонейтронных и двухнейтронных потоков систематическая ошибка в определении множественности может превышать 100%, и приведенный выше алгоритм позволяет многократно ее понизить. На рис. 10, б показан пример использования кластерного метода разделения одно- и двухнейтронных событий с разной интенсивностью. На рисунке изображено изменение вклада погрешности от однонейтронных событий в идентификацию двухнейтронных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная процедура разделения одно- и двухнейтронных событий по числу активных ячеек, количеству и форме кластеров эффективна даже в случае одинаковых энергий нейтронов, когда критерии, основанные на времяпролетной информации, неприменимы. Предложенные процедуры могут быть включены как составная часть полного алгоритма идентификации частиц в 3D нейтронных детекторах.

Авторы благодарны членам коллаборации BM@N и SPD за полезные дискуссии и сделанные ценные замечания.

Конфликт интересов. Авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *SPD Collab.* Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA // *Natural Sci. Rev.* 2024. V. 1. P. 1.
2. *BM@N Collab.* The BM@N Spectrometer at the NICA Accelerator Complex // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2024. V. 1065. P. 169532.
3. *Baulieu G. et al.* Construction and Commissioning of a Technological Prototype of a High-Granularity Semi-Digital Hadronic Calorimeter // *J. Instrum.* 2015. V. 10. P. P10039.
4. *Афанасьев С. В. и др.* Трехплечевой спектрометр SCAN-3 на внутренних мишенях нукло-трона // *ЭЧАЯ.* 2024. Т. 55, вып. 4. С. 1240–1248.
5. *Lashmanov N. et al.* Development of a TOF Neutron Spectrometer in the BM@N Experiment // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2024. V. 21, No. 4. P. 638–641.
6. *Boretzky K. et al.* NeuLAND: The High-Resolution Neutron Time-of-Flight Spectrometer for R3B at FAIR // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2021. V. 1014. P. 165701.

Получено 6 июня 2025 г.