

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО  
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.08

ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕДИНИЧНОГО МОДУЛЯ  
НЕЙТРОННОГО ДЕТЕКТОРА

© 2017 г. С. В. Афанасьев<sup>а</sup>, В. А. Басков<sup>б,\*</sup>, А. И. Львов<sup>б</sup>, А. В. Кольцов<sup>б</sup>, Ю. Ф. Кречетов<sup>а</sup>,  
Л. Н. Павлюченко<sup>б</sup>, В. В. Полянский<sup>б</sup>, С. С. Сидорин<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований  
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

<sup>б</sup> Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН  
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

\*e-mail: [paхра1@mail.ru](mailto:paхра1@mail.ru)

Поступила в редакцию 12.10.2016 г.

Представлены результаты исследования на космическом излучении временных характеристик сцинтилляционной пластины, являющейся элементом нейтронного детектора, предназначенного для измерения энергии нейтрона по времени пролета, а также определения координаты точки его взаимодействия с детектором. Временные разрешения элемента нейтронного детектора с использованием фотоумножителей P9814В и ФЭУ-63 составили  $\sigma \approx 0.14$  нс и  $\approx 0.29$  нс соответственно.

DOI: 10.7868/S0032816217040012

Одной из основных целей эксперимента [1] на внутреннем пучке Нуклотрона ОИЯИ является поиск в  $dA$ -столновениях эта-мезонных ядер – короткоживущих связанных состояний  $\eta$ -мезона и ядра. Предполагается создание двухплечевой экспериментальной установки, предназначенной для прецизионного измерения энергий частиц, испускаемых при распаде эта-мезонного ядра, и поиска узких подпороговых пиков в спектре суммарной энергии частиц, которые свидетельствовали бы об образовании связанного состояния  $\eta$ -мезона. Ожидается, что доминирующими и выделяющимися из фона сигналами распада эта-мезонных ядер будут коррелированные  $\pi^+n$ - и  $pn$ -пары, возникающие при аннигиляции остановившихся (захваченных)  $\eta$ -мезонов на внутриядерных нуклонах в процессах  $\eta N \rightarrow \pi N$  и  $\eta NN \rightarrow NN$ . Возникающие при этом нейтроны будут соответственно иметь кинетическую энергию около 90 и 270 МэВ. Их спектрометрию с необходимой в эксперименте точностью ( $\sigma_E \approx 3$  МэВ), диктуемой теоретически ожидаемой шириной связанного состояния и величиной эффектов “размазки” энергий за счет ферми-движения нуклонов и  $\eta$ -мезона в ядре, планируется осуществлять методом времени пролета на пролетной базе около 5–6 м. Соответствующее временное разрешение при детектировании нейтронов должно быть  $\sigma_T \sim 0.13$  нс.

Ранее был исследован прототип нейтронного детектора, состоящий из восьми сцинтилляцион-

ных пластин толщиной 10, длиной 800 и шириной 100 мм (сцинтиллятор – NE110), соединенных в одну сборку. Вариант такой сборки с ФЭУ-63 на торцах показал, что измеренное временное разрешение в  $\sim 3$  раза хуже, чем необходимо [2]. Анализ факторов, влияющих на временное разрешение прототипа нейтронного детектора, показал, что основной вклад в ухудшение разрешения вносит как поглощение света в тонких и протяженных сцинтилляторах из-за небольшой длины затухания ( $\sim 110$  см), так и временное разрешение ФЭУ-63.

На космическом излучении были продолжены исследования основного элемента нейтронного детектора (э.н.д.), которым являлась одна сцин-

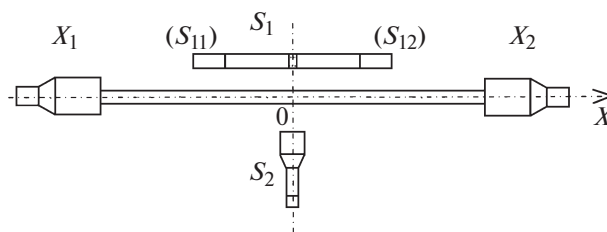
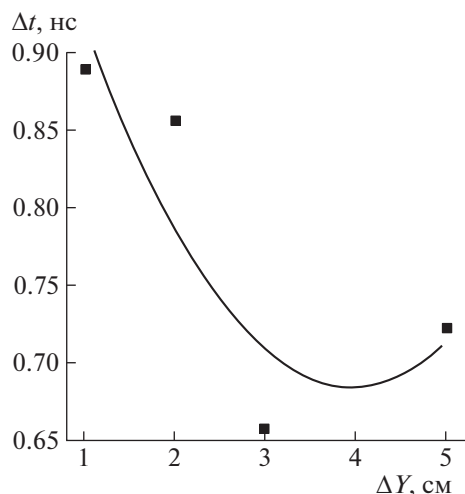


Рис. 1. Схема установки для исследований временных характеристик элемента нейтронного детектора (э.н.д.) на космическом излучении.  $S_1$  – стартовый счетчик (каналы  $S_{11}$  и  $S_{12}$ ),  $S_2$  – счетчик;  $X_1$ ,  $X_2$  – каналы, в которых используются ФЭУ-63 или фотоумножители P9814В и между которыми помещена исследуемая сцинтилляционная пластина.



**Рис. 2.** Зависимость временного разрешения  $\Delta t$  ФЭУ-63 от толщины сцинтилляционной пластины  $\Delta Y$  нейтронного детектора, где  $\Delta t$  – ширина временного спектра на половине его высоты (FWHM).

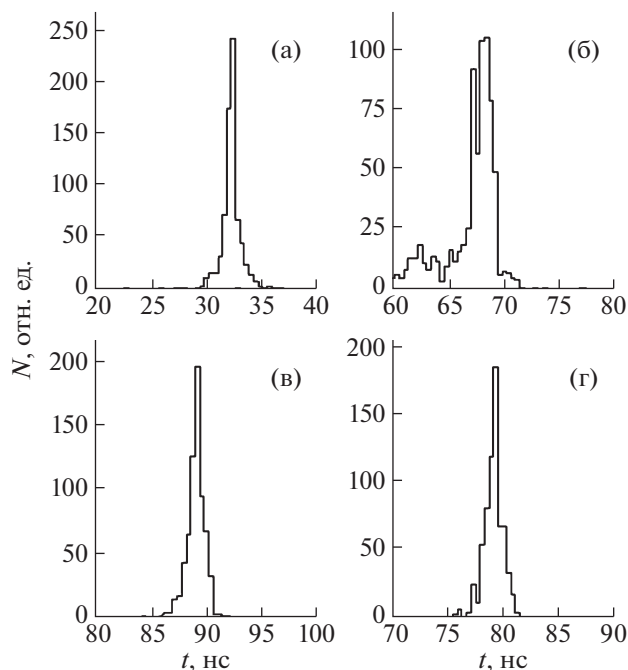
тилляционная пластина. Схема установки, на которой был исследован ряд таких пластин разной толщины, приведена на рис. 1. Размеры сцинтилляционных пластин составляли  $100 \times 500 \times \Delta Y$  мм, где  $\Delta Y$  – толщина пластины. Пластины просматривались с обоих торцов фотоумножителями (ф.э.у.) – каналы  $X_1$  и  $X_2$ .

Временное разрешение э.н.д. исследовалось в зависимости от толщины сцинтилляционной пластины  $\Delta Y$ , типа ф.э.у. в каналах  $X_1$  и  $X_2$ , напряжений на ф.э.у., типа отражающей поверхности между светоизолирующим кожухом и сцинтилляционной пластиной.

В исследованиях использовались пластины на основе полистирола толщиной  $\Delta Y = 1, 2, 3, 5$  см. Для регистрации света в пластине использовались ФЭУ-63 и ф.э.у. P9814В (производство фирмы ET-Enterprises, Англия [3]), входные окна которых были без смазки прижаты к торцам пластины. Для отражения света пластина была обернута (кроме торцов) черной бумагой, алюминизированным майларом или ватманом.

Триггерная система состояла из двух счетчиков: стартового счетчика  $S_1$  (каналы  $S_{11}$  и  $S_{12}$ ) и счетчика  $S_2$  (рис. 1). Стартовый счетчик  $S_1$  представлял собой пластиковый сцинтиллятор NE110 размером  $10 \times 10 \times 10$  мм, просматриваемый с двух сторон прижатыми к нему (к его торцам) ФЭУ-85 с типичным временным разрешением  $\sigma \approx 0.24$  нс [1]. Счетчик  $S_2$  состоял из сцинтиллятора NE110 размером  $40 \times 40 \times 50$  мм, который просматривался ФЭУ-87 через световод [4].

Для увеличения скорости набора данных расстояние между счетчиками  $S_1$  и  $S_2$  было миними-



**Рис. 3.** Временные гистограммы распределений сигналов со счетчиков  $S_1$ ,  $S_2$  и ФЭУ-63 при расположении счетчиков  $S_1$  и  $S_2$  относительно э.н.д. в точке  $x = 0$  с ватманом в качестве отражающей поверхности: а –  $S_{12}$ ; б –  $S_2$ ; в – канал  $X_2$ , ФЭУ-63; г – канал  $X_1$ , ФЭУ-63. Цена канала гистограмм 0.4 нс.

зировано. Расстояние между счетчиками  $S_1$  и э.н.д. составляло 2 см, а между э.н.д. и  $S_2$  – 0.5 см.

Электронная часть, обеспечивающая работу установки, была аналогична используемой в [2]. Запись данных в файл осуществлялась при разрезающем сигнале *Start* от канала  $S_{11}$  счетчика  $S_1$ .

В такой конфигурации установки набор данных в файл с общим числом сигналов *Start* порядка 50000 составлял в среднем одни сутки.

Для исследования характеристик э.н.д. на космических частицах наиболее подходящими являлись события, соответствующие off-line-триггеру  $T = S_{11} \cdot S_{12} \cdot S_2$ , означающего совпадение сигналов обоих каналов счетчика  $S_1$  и сигнала счетчика  $S_2$ .

Измерения проводились в трех точках по длине исследуемой пластины: центре  $x = 0$  и  $x = \pm 21$  см относительно геометрии, приведенной на рис. 1.

В первом варианте были исследованы ФЭУ-63, как и в работе [2].

Результаты измерений, связанные с исследованиями временного разрешения э.н.д. от толщины пластины  $\Delta Y$  в точке  $x = 0$ , представлены на рис. 2 (отражающей поверхностью для пластин каждой толщины являлась черная бумага). На этом рисунке точки соответствуют временному разреше-

нию при использовании ФЭУ-63, включая разрешение стартового счетчика  $S_1$  (канал  $S_{11}$ ).

Фитирование экспериментальных точек на рис. 2 параболой дало следующее выражение для полинома 2-й степени:

$$\Delta t = 1.1248 - 0.22199\Delta Y + 0.028018\Delta Y^2.$$

Поведение  $\Delta t(\Delta Y)$ -фита данных подчеркивает наличие минимума в зависимости временного разрешения ФЭУ-63 от толщины пластины сцинтиллятора для величин в диапазоне  $\Delta Y$  от 3 до 4 см.

Надо отметить, что для каждого значения толщины э.н.д. и типа ф.э.у. по критерию “минимум временного разрешения” выбиралось оптимальное напряжение питания каждого делителя ф.э.у. [2]. Для толщины э.н.д.  $\Delta Y = 3$  см и ФЭУ-63 оно составило:  $U_{X_1} = 2525$  В и  $U_{X_2} = 2300$  В.

Зависимость временного разрешения э.н.д. от отражающей поверхности при использовании ФЭУ-63 представлена таблицей.

Видно, что для данного размера э.н.д. и регистрации света только одним ФЭУ-63 в качестве отражающей поверхности выгодно использовать белую бумагу (ватман). Для регистрации света двумя ФЭУ-63 предпочтительнее использовать алюминизированный майлар.

Временные гистограммы со счетчиков триггера  $T = S_{11} \cdot S_{12} \cdot S_2$  в конфигурации  $x = 0$  и с ФЭУ-63, расположенных на торцах э.н.д., представлены на рис. 3. В качестве отражающей поверхности использован ватман.

Для сравнения на рис. 4 приведены временные распределения сигналов с ФЭУ-63 (канал  $X_1$ ) для точки  $x = 0$  с использованием черной бумаги (рис. 4а) и ватмана (рис. 4б).

Таким образом, при выбранной конфигурации триггера ( $T = S_{11} \cdot S_{12} \cdot S_2$ ) и его временном разрешении  $\sigma \approx 0.24$  нс [2], толщине э.н.д.  $\Delta Y =$

Зависимость ширины временного разрешения э.н.д. [нс] при использовании одного ФЭУ-63 (канал  $X_1$ ) от типа светоотражающей поверхности

Светоотражающая поверхность	Положение счетчиков $S_1$ и $S_2$ относительно э.н.д.		
	$x = -21$ см	$x = 0$	$x = 21$ см
Черная бумага	0.8	1.6	2.0
Алюминизированный майлар	0.4	1.2	2.0
Белая бумага (ватман)	1.2	1.2	1.2

$= 3$  см, отражающей поверхности из ватмана, расположении триггерных счетчиков  $S_1$  и  $S_2$  для положения  $x = 0$  и оптимальных напряжениях питания на делителях ФЭУ-63 лучшее временное разрешение ФЭУ-63 составило  $\sigma \approx 0.29$  нс или  $\Delta t \approx 0.68$  нс ( $\Delta t$  – ширина на половине высоты временного спектра (FWHM)), см. рис. 2.

Исследования ф.э.у. P9814В проходили так же, как и ФЭУ-63. Конфигурация триггера оставалась прежней  $T = S_{11} \cdot S_{12} \cdot S_2$ . Для уменьшения разброса длины треков космических частиц в э.н.д. расстояние между  $S_1$  и  $S_2$  было увеличено с 2 до 22 см. Также были уменьшены размеры сцинтиллятора и изменена конструкция  $S_2$ . Счетчик  $S_2$  состоял из сцинтиллятора размером  $18 \times 18 \times 4$  мм на основе полистирола, который просматривался ФЭУ-85 через световод длиной 100 мм.

Для обоих ф.э.у. P9814В, также по критерию “минимума временного разрешения”, были определены рабочие напряжения ( $U_{X_1} = 1920$  В и  $U_{X_2} = 1860$  В). В качестве отражающей поверхности э.н.д. использовался ватман.

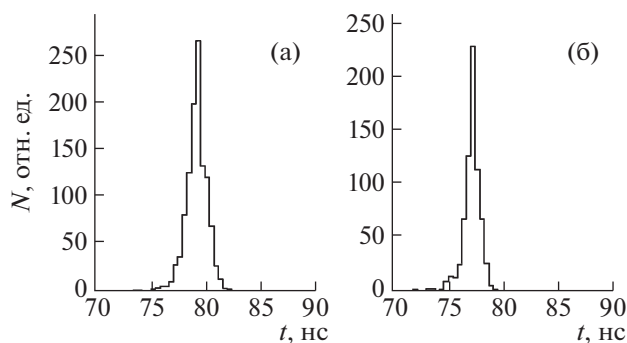


Рис. 4. Временные гистограммы распределений с ФЭУ-63 (канал  $X_1$ ) при расположении счетчиков  $S_1$  и  $S_2$  в положении  $x = 0$  относительно э.н.д. в зависимости от типа отражающей поверхности: а – черная бумага; б – ватман. Цена канала гистограмм 0.4 нс.

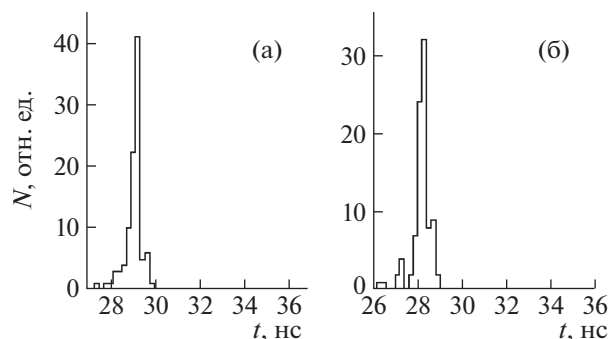
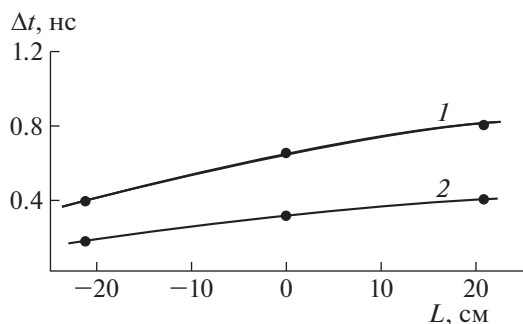


Рис. 5. Временные гистограммы распределений с P9814В при расположении счетчиков  $S_1$  и  $S_2$  в положении  $x = 0$ : а – канал  $X_1$ ; б – канал  $X_2$ . Цена канала гистограмм 0.2 нс.



**Рис. 6.** Изменение временного разрешения ФЭУ-63 (1) и Р9814В (2) в зависимости от точки прохождения частиц космического излучения через э.н.д.  $L$  – расстояние от центра э.н.д. до триггерных счетчиков;  $\Delta t$  – временное разрешение ф.э.у. (FWHM).

На рис. 5 представлены типичные результаты исследований временных характеристик Р9814В в положении  $x = 0$ . Усреднение по всей набранной статистике обоих каналов  $X_1$  и  $X_2$  с учетом временного разрешения триггера дало  $\sigma \approx 0.14$  нс ( $\Delta t \approx 0.32$  нс).

Изменение временных разрешений ФЭУ-63 и Р9814В в зависимости от точки прохождения частиц космического излучения через э.н.д. представлено на рис. 6. Видно, что в обоих случаях временное разрешение ф.э.у. улучшается с уменьшением расстояния от точки прохождения частиц через пластину до ф.э.у., причем во всем диапазоне расстояний временное разрешение Р9814В примерно в 2 раза лучше по сравнению с ФЭУ-63.

Таким образом, несмотря на то, что ФЭУ-63 по сравнению с Р9814В регистрирует весь свет, выходящий из э.н.д., его оказывается недостаточно для получения временного разрешения, лучшего чем у Р9814В.

Исследования временного разрешения элемента нейтронного детектора показали, что при размерах сцинтилляционной пластины  $100 \times 500$  мм толщина, при которой получено лучшее временное разрешение, находится в диапазоне от 30 до 40 мм. Для регистрации сцинтилляционного света предпочтительно использовать ф.э.у. Р9814В, поскольку временное разрешение данных ф.э.у. вне зависимости от точки прохождения частицы через сцинтилляционную пластину в  $\sim 2$  раза лучше, чем в случае использования ФЭУ-63, и соответствует диапазону разрешений, определенных моделированием эксперимента.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Afanasiev S.V., Bekmirzaev R.N., Baskov V.A., Cruceru I., Constantin F., Cruceru M., Ciolacu L., Dirner A., Dryblov D.K., Dubinchik B.V., Ibadov R.M., Igamkulov Z.A., Ivanov V.I., Isupov A.Yu., Jomurodov D.M. et al. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 2013. V. 245. P. 173. <http://dx.doi.org/doi10.1016/j.nuclphysbps.2013.10.034>
2. Афанасьев С.В., Басков В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Павлюченко Л.Н., Полянский В.В., Ржанов Е.В., Сидорин С.С. // ПТЭ. 2016. № 5. С 33. doi 10.7868/S0032816216050013
3. Веб-сайт производителя ф.э.у. Р9814В: [www.et-enterprises.com](http://www.et-enterprises.com)
4. Афанасьев С.В., Жильцова Л.Я., Колесников В.И., Малахов А.И., Мелкумов Г.Л., Семенов А.Ю. // Краткие сообщения ОИЯИ. 1997. № 1[81]-97. С. 45.