

УДК 539.1.08

## КАЛИБРОВКА ЛИВНЕВОГО СВИНЦОВО-СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО СПЕКТРОМЕТРА НА КОСМИЧЕСКОМ ИЗЛУЧЕНИИ

В. И. Алексеев<sup>1</sup>, В. А. Басков<sup>1</sup>, В. А. Дронов<sup>1</sup>, А. И. Львов<sup>1</sup>,  
А. В. Кольцов<sup>1</sup>, Ю. Ф. Кречетов<sup>2</sup>, В. В. Полянский<sup>1</sup>, С. С. Сидорин<sup>1</sup>

*Представлены результаты калибровки космическими мюонами ливневого свинцово-сцинтилляционного спектрометра типа “сэндвич” толщиной  $8.5X_0$ , предназначенного для работы в высокоинтенсивных фотонных и электронных пучках ( $\sim 10^6$  частиц/сек) с энергией 0.1–1.0 ГэВ. Обнаружено, что относительное энергетическое разрешение спектрометра зависит от угла входа космических мюонов в спектрометр в вертикальной плоскости и не зависит от угла входа в горизонтальной плоскости. Относительное энергетическое разрешение спектрометра составило  $\delta = 16\%$ . Помещение перед спектрометром дополнительной свинцово-сцинтилляционной сборки толщиной  $2.2X_0$  улучшило относительное энергетическое разрешение спектрометра до  $\delta = 9\%$ .*

**Ключевые слова:** спектрометр, сэндвич, сместитель спектра, космические мюоны, триггер.

В экспериментальной физике для регистрации электромагнитных продуктов распадов (гамма-квантов, электронов и позитронов), а также определения характеристик калибровочных электронных (позитронных) и фотонных пучков остаётся актуальной задача совмещения в одном детекторе хорошего временного и энергетического разрешений. Хорошее энергетическое разрешение традиционно достигается применением различных типов кристаллов (NaI(Tl), CsI и т. д.), в которых для получения хорошего

<sup>1</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: baskov@x4u.lebedev.ru.

<sup>2</sup> Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Россия, Московская область, Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6.

временного разрешения используется разбиение детекторов на составные части с вставками из быстрого пластического сцинтиллятора или выделение быстрой компоненты во временном спектре [1]. Тем не менее, остаётся интерес к наиболее дешевым и обладающим большими конструктивными возможностями многопластинчатый свинцово-сцинтилляционным спектрометрам типа “сэндвич” [2, 3].

В Отделе ядерных исследований Физического института им. П. Н. Лебедева на ускорителе “Пахра” созданы калибровочный канал высокоинтенсивного  $\sim 10^{10}$   $e^-$ /сек выведенного пучка электронов энергией 250–500 МэВ с возможностью изменения интенсивности до  $\sim 10^3 - 10^5$   $e^-$ /сек и калибровочный квазимонохроматический пучок вторичных электронов (позитронов) на основе тормозного пучка фотонов с энергией 30–300 МэВ и интенсивностью при диаметре основного коллиматора 30 мм до  $\sim 10^2$   $e^- (e^+)/$ сек [4]. Для определения характеристик калибровочных пучков создан двухканальный ливневый свинцово-сцинтилляционный спектрометр (ЛС) со снятием сигналов с помощью одного сместителя спектра (шифтера) (рис. 1).

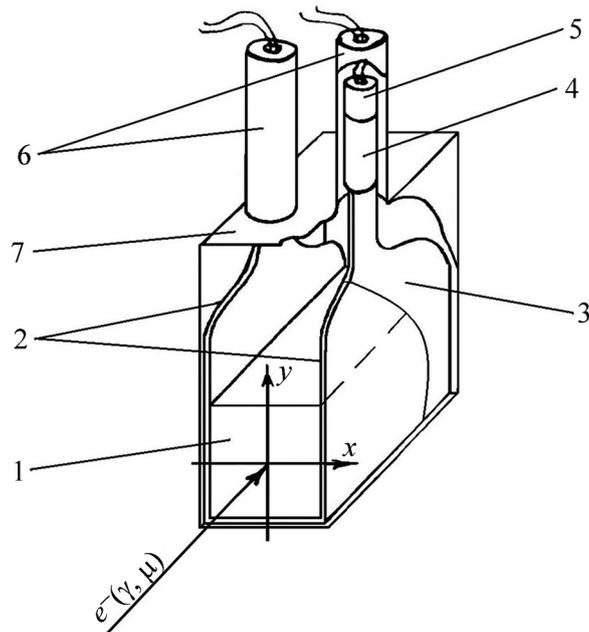


Рис. 1: Схема двухканального ливневого свинцово-сцинтилляционного спектрометра (ЛС) с использованием сместителя спектра (шифтера): 1 – свинцово-сцинтилляционная сборка; 2 – оргстекло со сместителем спектра; 3 – алюминизированный майлар; 4 – ФЭУ-85; 5 – делитель напряжения; 6 – корпус для ФЭУ; 7 – внешний светозащитный корпус.

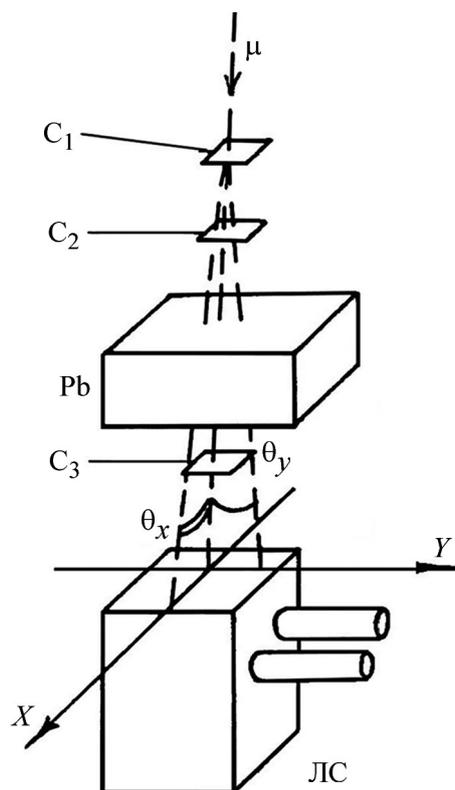


Рис. 2: Схема калибровки ЛС на космических мюонах:  $C_1$ – $C_3$  – сцинтилляционные триггерные счетчики; Pb – свинцовый блок; ЛС – ливневой свинцово-сцинтилляционный спектрометр.

При конструировании свинцово-сцинтилляционного спектрометра было учтено, что применение фотоумножителей (ФЭУ) с быстрым временем формирования сигнала, сцинтилляторов с быстрым временем высвечивания и наличие двух каналов, с помощью которых можно будет формировать внутренний триггер, даст возможность работать спектрометру в условиях больших нагрузок и значительно снизить число случайных совпадений. Учитывалось также, что снижение числа случайных совпадений будет обусловлено наличием естественного энергетического порога, существующего в случае развития электромагнитного ливня в веществе спектрометра. Поэтому, для снятия сигнала со свинцово-сцинтилляционной сборки было решено использовать сместитель спектра (шифтер) [3, 5].

Конструкция ЛС является типичной для спектрометров такого типа. Спектрометр содержит 23 пластины свинца (2 мм) и пластического сцинтиллятора типа “полистирол” (5 мм) с поперечными размерами  $160 \times 160$  мм<sup>2</sup>. Общая толщина спектрометра состави-

ла  $8.5X_0$  ( $X_0$  – радиационная длина). Для улучшения светосбора между свинцовыми и сцинтилляционными пластинами помещен алюминизированный майлар. Сбор света осуществляется одновременно с трех сторон свинцово-сцинтилляционной сборки одним шифтером и выводится на противоположные торцы. Шифтер является пластиной из оргстекла шириной 160 мм, длиной 600 мм и толщиной 3 мм с нанесенной на поверхность оргстекла (“поверхностный” шифтер) спектросмещающей добавкой (1.5-дифенил-3 стирил-празонин). Полная длина пластины оргстекла от ФЭУ до ФЭУ 600 мм, длина покрытия составляет 400 мм, длина прозрачных промежутков между спектросмещающим покрытием и выходными торцами пластин к ФЭУ составляет 100 мм. Свет с каждого торца пластины снимается фотоумножителями ФЭУ-85 со стандартными делителями напряжения.

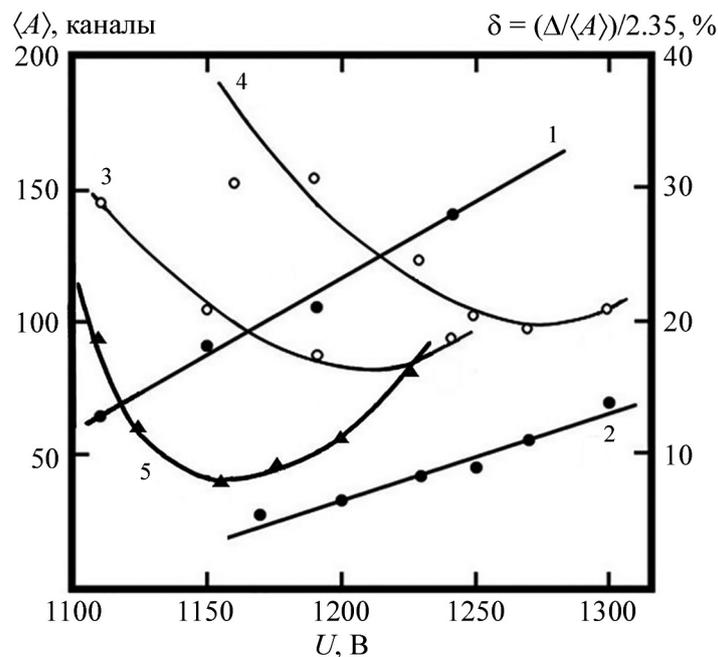


Рис. 3: Зависимость средней амплитуды, относительного энергетического разрешения каналов ЛС и относительного энергетического разрешения составного ливневого спектрометра, состоящего из ЛС и дополнительной сборки (ДС), от напряжения на делителях напряжения ФЭУ каналов ЛС и ДС: 1, 2 – зависимости средней амплитуды сигналов каналов 1 и 2 ЛС, соответственно; 3, 4 – зависимости относительного энергетического разрешения каналов 1 и 2 ЛС, соответственно; 5 – зависимость относительного энергетического разрешения составного спектрометра ЛС+ДС.

Предварительная калибровка ЛС была произведена на мюонах космического излучения. Схема калибровки представлена на рис. 2. Размеры триггерных счетчиков составляли:  $C_1$  и  $C_2 - 40 \times 40 \times 5 \text{ мм}^3$ ,  $C_3 - 20 \times 20 \times 5 \text{ мм}^3$ . Толщина свинцового блока между  $C_2$  и  $C_3$  составляла 70 мм. Углы входа частиц в ЛС  $\theta_x$  и  $\theta_y$  изменялись перемещением  $C_3$  вдоль осей  $X$  и  $Y$ , соответственно. Положения счетчиков  $C_1$  и  $C_2$  не менялись. Космические мюоны являются минимальноионизирующими частицами и выделяют в пластическом сцинтилляторе энергию  $\sim 2 \text{ МэВ/см}$ , поэтому суммарное энерговыделение в сцинтилляционных пластинах ЛС составляет  $\sim 23 \text{ МэВ}$ .

На рис. 3 представлены зависимости средних амплитуд (зависимости 1 и 2) и энергетических разрешений (зависимости 3 и 4) каналов ЛС от напряжений на делителях напряжений при прохождении мюонов через центр спектрометра ( $\theta_x = \theta_y = 0$ ). Видно, что зависимости средних амплитуд обоих каналов ЛС в пределах исследованных напряжений на делителях напряжений линейные. Наилучшие относительные энергетические разрешения каналов оказались равными  $\delta_1 \approx 20\%$  и  $\delta_2 \approx 18\%$  при напряжениях

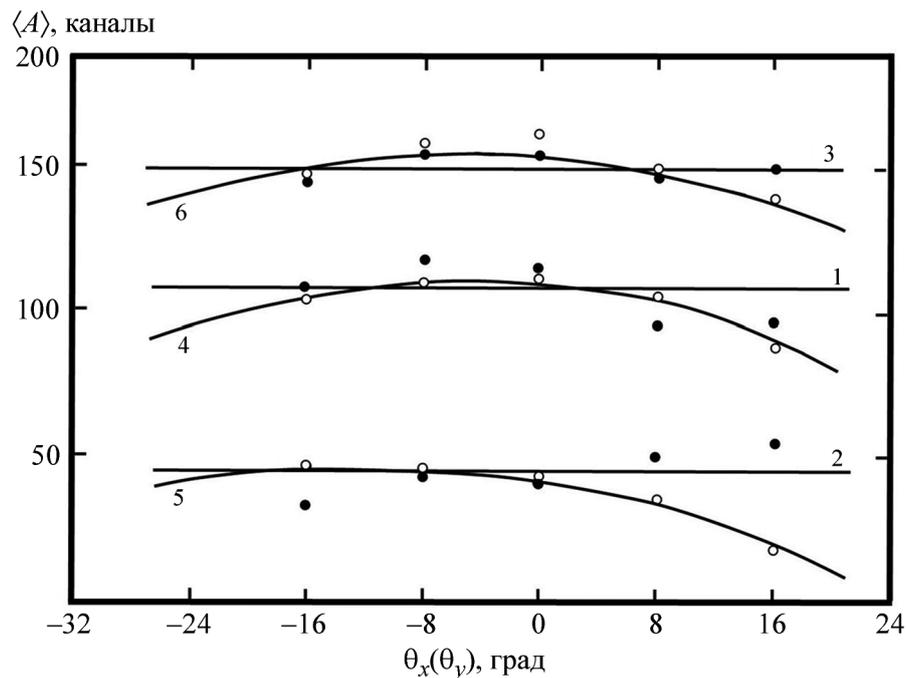


Рис. 4: Зависимости средней амплитуды сигналов отдельных каналов и суммарной амплитуды ЛС от угла входа мюонов в спектрометр: 1–3 – относительно горизонтальной оси ( $\theta_x$ ); 4–6 – относительно вертикальной оси ( $\theta_y$ ) (1, 4 – 1 канал ЛС; 2, 5 – 2 канал ЛС; 3 и 6 – зависимости суммарной амплитуды).

на делителях  $U_1 = 1220$  В и  $U_2 = 1265$  В, соответственно. Так как амплитуда сигнала в каналах ЛС соответствует одной и той же величине энергии, оставленной мюоном при прохождении через ЛС, то относительные энергетические разрешения каналов определялись как  $\delta_{1(2)} = \sigma_{1(2)} / \langle A_{1(2)} \rangle = ((\Delta A_{1(2)} / \langle A_{1(2)} \rangle) / 2.35) \cdot 100\%$ , где  $\sigma_{1(2)}$  – стандартное отклонение средней амплитуды сигналов амплитудного спектра первого (второго) канала;  $\Delta A_{1(2)}$  – полная ширина на половине высоты амплитудного спектра сигналов с ФЭУ первого (второго) канала;  $\langle A \rangle$  – средняя амплитуда в амплитудном спектре первого (второго) канала; 2.35 – коэффициент пропорциональности, определяющий связь соотношения  $\Delta E$  и  $\sigma$  ( $\Delta E = 2 \cdot \sigma \cdot \sqrt{2} \cdot \ln 2 \approx 2.35 \cdot \sigma$ ).

На рис. 4 представлены зависимости изменения средних амплитуд сигналов каналов  $\langle A \rangle$  от углов  $\theta_x$  и  $\theta_y$  входа мюонов в спектрометр. Углы входа мюонов в спектрометр относительно каждой из осей  $\theta_x$  и  $\theta_y$  изменялись от  $-16^\circ$  до  $+16^\circ$ . Видно, что амплитуды сигналов обоих каналов ЛС при изменении  $\theta_x$  (зависимости 1 и 2), в отличие от амплитуд сигналов при изменении  $\theta_y$  (зависимости 4 и 5), практически постоянны. Такой же эффект наблюдается и в сравнении зависимостей суммарных амплитуд обоих каналов (зависимости 3 и 6). Это означает, что при изменении  $\theta_x$  трехстороннее светособирание со сцинтилляционных пластин ЛС однородно. Можно предположить, что при изменении  $\theta_x$  уменьшение величины светособирания с одной стороны ЛС ведет к увеличению величины светособирания с другой стороны ЛС в такой пропорции, что общая величина светособирания практически постоянна. Если меняется  $\theta_y$ , то отсутствие светособирания с четвертой стороны ЛС приводит к неоднородности в величине светособирания и непостоянству амплитуды сигналов.

Зависимости изменения относительного энергетического разрешения ЛС от углов входа мюонов в спектрометр  $\theta_x$  и  $\theta_y$  представлены на рис. 5. Относительное энергетическое разрешение отдельных каналов ЛС (зависимости 1 и 2) при изменении  $\theta_x$  непостоянно и меняется в пределах  $\sim 10\%$  от значений при  $\theta = 0^\circ$ . Энергетическое разрешение спектра суммы сигналов каналов (зависимость 3) практически во всем измеренном диапазоне углов  $\theta_x$  постоянно и составило  $\delta \approx 16\%$ . Результат неоднородности светособирания при изменении угла входа мюонов в ЛС относительно  $\theta_y$  приводит к тому, что наблюдается неоднородность и в энергетическом разрешении отдельных каналов и суммы сигналов (зависимости 4, 5 и 6) во всем измеренном диапазоне углов  $\theta_y$ . Неоднородность в энергетическом разрешении в этом случае более значительная и достигает  $\sim 30\%$ .

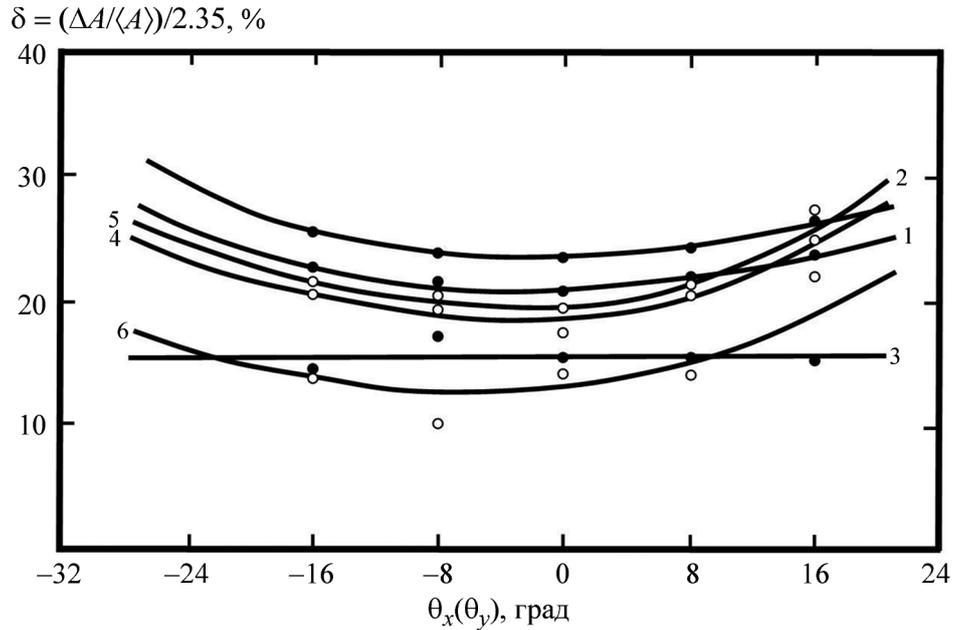


Рис. 5: Зависимости относительного энергетического разрешения ЛС от угла входа мюонов в спектрометр: 1–3 – зависимости от угла входа мюонов относительно горизонтальной оси ( $\theta_x$ ); 4–6 – зависимости от угла входа мюонов относительно вертикальной оси ( $\theta_y$ ) (1, 4 и 2, 5 – зависимости для каналов 1 и 2, соответственно; 3 и 6 – зависимости суммы каналов).

Для улучшения энергетического разрешения перед ЛС была помещена дополнительная свинцово-сцинтилляционная сборка ДС, состоящая из 4 пластин свинца толщиной 3 мм и сцинтиллятора толщиной 5 мм. Размеры пластин ДС составляли  $100 \times 100 \text{ мм}^2$ . Съём света осуществлялся с 4 сторон пластин шифтером с выводом света на ФЭУ-85 [3]. Относительное энергетическое разрешение составного ливневого спектрометра ЛС+ДС (СЛС) от напряжения на делителе ФЭУ ДС представлено на рис. 3 (зависимость 5). Наилучшее разрешение СЛС достигается при напряжении на делителе напряжения ДС  $U = 1150 \text{ В}$  и составляет  $\delta = 9\%$ .

Калибровка космическими мюонами двухканального ливневого свинцово-сцинтилляционного спектрометра на сместителе спектра показала, что существует зависимость средней амплитуды сигналов отдельных каналов спектрометра и суммарного сигнала, а также относительного энергетического разрешения отдельных каналов и общего относительного разрешения от углов входа мюонов в спектрометр в исследуемом диапазоне углов входа  $\pm 16^\circ$ . При изменении углов входа по горизонтали

$\theta_x$  зависимость практически отсутствует. Наилучшее относительное энергетическое разрешение достигается при прохождении мюонов по центру спектрометра при угле  $\theta_x = \theta_y = 0^\circ$  и составляет  $\delta = 16\%$ . Расположение перед ЛС дополнительной свинцово-сцинтилляционной сборки ДС и съемом света с помощью сместителя спектра с четырех сторон сборки приводит к улучшению относительного энергетического разрешения суммарного ливневого спектрометра ЛС+ДС (СЛС), которое достигает величины  $\delta = 9\%$ . Таким образом, ливневой свинцово-сцинтилляционный спектрометр способен определять с хорошей точностью энергетические характеристики электронных (позитронных) и фотонных пучков, использоваться в качестве самостоятельного детектора в физических экспериментах. Более детально временное разрешение спектрометра предполагается изучить непосредственно при работе на высокоинтенсивном калибровочным пучке ускорителя “Пахра”.

Авторы благодарны Л. А. Горбову за помощь в работе.

Работа выполнена при поддержке грантов Российского Фонда Фундаментальных Исследований (НИСА – РФФИ) № 18-02-40061 и № 18-02-40079.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. А. Басков, Ю. А. Башмаков, А. В. Верди и др., ПТЭ № 1, 42 (1995).
- [2] В. А. Басков, Б. Б. Говорков, В. В. Полянский, Краткие сообщения по физике ФИАН **41**(5), 37 (2014). DOI: 10.3103/S1068335614050054.
- [3] В. А. Басков, Б. Б. Говорков, В. В. Полянский, Краткие сообщения по физике ФИАН **43**(3), 37 (2016). DOI: 10.3103/S1068335616030052.
- [4] В. И. Алексеев, В. А. Басков, В. А. Дронов и др., ПТЭ № 2, 1 (2019). DOI: 10.1134/S0020441219020143.
- [5] В. А. Басков, А. В. Верди, Б. Б. Говорков и др., Препринт ФИАН № 38 (ФИАН, Москва, 1999).

Поступила в редакцию 26 марта 2020 г.

После доработки 18 мая 2020 г.

Принята к публикации 21 июля 2020 г.