

УДК 539.1.08

СПЕКТРОМЕТРЫ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ЛИВНЕЙ, ВЫХОДЯЩИХ ИЗ ОРИЕНТИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ

© 2011 г. В. А. Басков, А. С. Белоусов, В. В. Ким, Е. И. Малиновский, А. П. Усик, В. А. Хабло

Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН

Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

Поступила в редакцию 01.02.2011 г.

Представлена конструкция и приведены основные характеристики составных ливневых спектрометров (л.с.): составного черенковского и свинцово-сцинтилляционного, предназначенных для исследования ливневых процессов в ориентированных кристаллах и состоящих из десяти независимых светоизолированных счетчиков толщиной $1X_0$ и $1.18X_0$ соответственно. При энергии электронов $E_e = 26$ ГэВ энергетическое разрешение обоих л.с. совместно с черенковским спектрометром толщиной $15X_0$, располагавшимся за ними, составило 2.4% для составного черенковского л.с. и 4.3% для свинцово-сцинтилляционного л.с.

В рамках программы “Квантовая электродинамика в сильных полях ориентированных кристаллов” на электронном канале 2В ускорителя У-70 Института физики высоких энергий в Протвино на установке “Каскад” были проведены исследования развития электромагнитных ливней от γ -квантов и электронов с энергиями в десятки гигаэлектронвольт ($E \leq 30$ ГэВ) в полях осей и плоскостей ориентированных кристаллов. При таких энергиях когерентный характер взаимодействия частиц с полем оси или плоскости кристалла приводит к значительному росту сечений всех электродинамических процессов. Еще больший рост сечений электродинамических процессов наблюдается в области, которая получила название области “постоянного сильного поля” (п.с.п.). Область п.с.п. формируется при углах входа частиц в кристалл $\Theta \ll \Theta_{\text{п.с.п}} = V/mc^2$ (Θ – угол между импульсом γ -кванта, электрона или позитрона и осью (плоскостью) кристалла; V – масштаб потенциала оси (плоскости); m – масса электрона; c – скорость света) [1–5].

Электромагнитные ливни, образованные γ -квантами и электронами при взаимодействии с кристаллом в области п.с.п. (аномальные ливни), отличаются от ливней в аморфном веществе. Отличие ливней в ориентированных кристаллах (кристалл считается ориентированным, когда $\Theta \leq \Theta_{\text{п.с.п}}$, и разориентированным, когда $\Theta \gg \Theta_{\text{п.с.п}}$) проявляется во всех характеристиках ливней: множественности заряженных и незаряженных частиц ливня, энергиях частиц по глубине развития ливня; наличии ориентационной зависимости; уменьшении радиационной длины кристалла и т. д. [2–5].

Регистрация электромагнитных ливней, выходящих из кристалла, проводилась составными лив-

невыми спектрометрами (с.л.с.), помещавшимися за кристаллом.

В данной работе представлена конструкция, даны основные характеристики с.л.с. и описана методика калибровки с.л.с. на пучке электронов и фотонов высоких энергий, а также приведены зависимости развития ливней в с.л.с. от толщины разориентированного кристалла (конвертора), который в этом случае имел характеристики аморфного вещества.

Схема установки “Каскад” представлена на рис. 1. Сцинтилляционные счетчики A_1 – A_3 , C_1 – C_6 формировали триггер. Пропорциональные камеры $ПК_1$ – $ПК_3$ использовались для определения координат входа каждого электрона в кристалл [1]. Сцинтилляционный счетчик T предназначался для определения средней множественности заряженных частиц в ливнях, выходящих из кристалла [4].

Для создания пучка фотонов использовалась амплитудно-координатная система мечения фотонов на основе многоканального свинцово-сцинтилляционного спектрометра полного поглощения на сместителях спектра (МСППС) [6].

В работе использовались кристаллы кремния (Si), вольфрама (W), граната ($Gd_3Ga_5O_{12}$) и вольфрамата ($PbWO_4$) разной толщины.

В эксперименте использовались пучки электронов с энергиями $E_e = 26, 28$ и 30 ГэВ с импульсным разбросом 0.76 ГэВ/с и расходимостью $|\nu| \leq 0.1$ мрад. Диапазон энергий фотонных пучков составлял 3–28 ГэВ.

Ливень, выходящий из кристалла, продолжал развиваться в с.л.с. Составной ливневый спектрометр предназначен для исследования развития электромагнитных ливней в ориентирован-

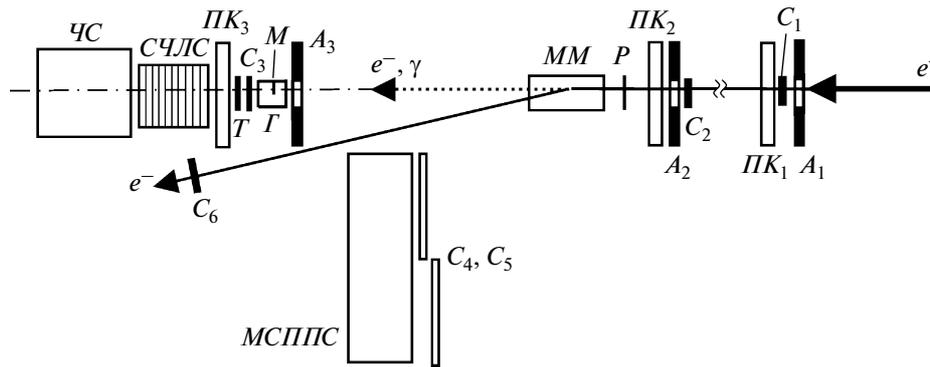


Рис. 1. Схема экспериментальной установки "Каскад". A_1 – A_3 и C_1 – C_6 – сцинтиляционные счетчики; $ПК_1$ – $ПК_3$ – пучковые пропорциональные камеры; P – радиатор; $ММ$ – магнит системы мечения фотонов; $Г$ – гониометр; $М$ – кристаллический конвертор; $Т$ – сцинтиляционный счетчик для регистрации заряженных частиц ливня; $СЧЛС$ ($ССЛС$) – составной черенковский ливневый спектрометр (составной свинцово-сцинтиляционный ливневый спектрометр); $ЧС$ – черенковский спектрометр; $МСППС$ – многоканальный свинцово-сцинтиляционный спектрометр полного поглощения.

ных кристаллах. Характеристики электромагнитных ливней в кристаллах определялись по анализу формы каскадных и интегральных кривых в с.л.с.

В исследованиях использовались составные спектрометры двух типов: черенковский ливневый спектрометр ($СЧЛС$) и составной свинцово-сцинтиляционный ливневый спектрометр ($ССЛС$).

$СЧЛС$ и $ССЛС$ состояли из 10 одинаковых независимых светоизолированных счетчиков, с каждого из которых можно было с помощью фотоэлектронного умножителя (ф.э.у.) снимать амплитудный сигнал.

Каждый счетчик $СЧЛС$ (рис. 2) представлял собой радиатор из свинцового стекла ТФ-1 размером 100×100 мм и толщиной 2.5 см или $1X_0$ (X_0 – радиационная длина).

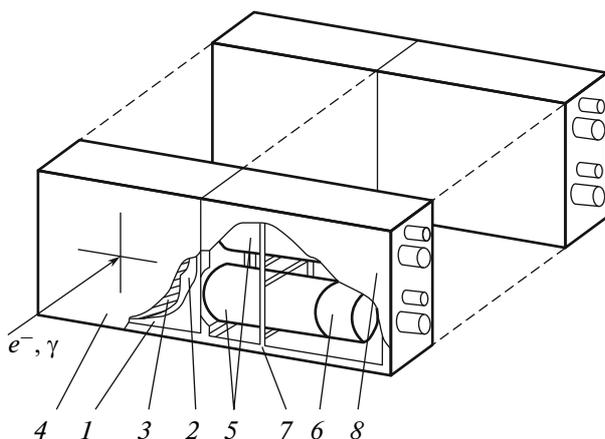


Рис. 2. Составной черенковский ливневый спектрометр ($СЧЛС$). 1 – радиатор (свинцовое стекло ТФ-1); 2 – алюминизированный майлар; 3 – черная светонепроницаемая бумага; 4 – черная изоляционная лента; 5 – ФЭУ-85; 6 – делитель; 7 – крепления радиатора, ф.э.у. и делителей; 8 – корпус.

Для снятия светового сигнала было предусмотрено использование двух ФЭУ-85, работающих независимо друг от друга [7]. Окна ф.э.у. непосредственно прилегали к торцу радиатора и для лучшего светосбора на окна была нанесена светопроводящая смазка. В исследованиях ливневых процессов в кристаллах использовался один ф.э.у.

Радиаторы вместе с ф.э.у. и делителями закреплялись на стальной конструкции и помещались в тонкий стальной корпус. Радиатор счетчика обертывался алюминизированным майларом, светонепроницаемой черной бумагой и дополнительно обертывался черной изоляцией.

Каждый счетчик $ССЛС$ (рис. 3) состоял из четырех пластин свинца толщиной 1.5 мм и размером 90×90 мм, прослоенных четырьмя пластинами пластического сцинтиллятора такого же размера и толщиной 5 мм. Все грани сцинтилляторов были отполированы и, кроме одной, обернуты

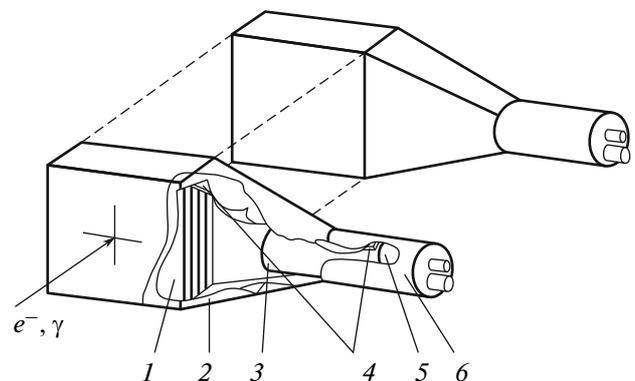


Рис. 3. Составной свинцово-сцинтиляционный ливневый спектрометр ($ССЛС$). 1 – свинцово-сцинтиляционная сборка; 2 – алюминизированный майлар; 3 – ф.э.у.; 4 – направляющая; 5 – делитель; 6 – стальной стакан.

Таблица 1. Схема калибровки *СЧЛС* и *ЧС* “методом сдвижки каскадной кривой” ($E_e = 26$ ГэВ). Колонки 1–7 соответствуют этапам калибровки

№ счетчика (<i>i</i>)	$\langle A_{k,i} \rangle$, каналы			$\langle A_{k,i}^{\text{отн}} \rangle$		$\langle \Delta E_i \rangle$, ГэВ	C_i
	1	2	3	4	5		
	$k = 0$	$k = 9$	$k = 10$	$k = 9$	$k = 10$	6	7
1			100		0.0186	0.055	0.000550
2		166	550	0.0186	0.0618	0.183	0.000333
3		330	1085	0.0618	0.2031	0.600	0.000553
4		1167	2240	0.2031	0.3898	1.151	0.000514
5		1628	2640	0.3898	0.6321	1.867	0.000707
6		2560	3318	0.6321	0.8193	2.419	0.000729
7		3816	4500	0.8193	0.9661	2.853	0.000634
8		5000	5175	0.9661	1.0000	2.953	0.000571
9		4800	4596	1.0000	0.9576	2.827	0.000615
10		6350	6022	0.9576	0.9081	2.682	0.000445
11 (<i>ЧС</i>)	5410	2240	1750			8.410	0.004806
<i>СЧЛС + ЧС</i>						26.000	

алюминизированным майларом. Радиационная толщина счетчика составила $1.18X_0$.

Для регистрации светового потока, выходящего из сцинтилляторов, использовался один ФЭУ-85, который вместе со стандартным делителем закреплялся на стальной направляющей так, чтобы его фотокатод был направлен на грани сцинтилляторов, не обернутых майларом. Световой поток, выходящий из сцинтилляторов, попадал на фотокатод ф.э.у. через воздушный промежуток длиной 100 мм. Для лучшего светособирания между свинцово-сцинтилляционной сборкой и ф.э.у. был помещен светоотражательный конус из алюминизированного майлара.

За *СЧЛС* и *ССЛС* для сбора оставшейся части ливня помещался черенковский спектрометр *ЧС* толщиной $15X_0$. *ЧС* имел шестигранный радиатор из свинцового стекла ТФ-1 с диаметром вписанной окружности 180 мм [8].

Калибровка составного ливневого спектрометра проводилась методом “сдвижки каскадной кривой”, которая применялась при калибровке *СЧЛС* при энергиях частиц $E_e \leq 1$ ГэВ в работе [7]. Так как *СЧЛС* и *ССЛС* использовались для регистрации электронов и фотонов при энергиях в диапазоне $E = 3-30$ ГэВ, то были проведены новые калибровки детекторов электронами с энергией $E_e = 26$ ГэВ и $E_e = 28$ ГэВ.

Этапы калибровки с.л.с. на примере *СЧЛС* показаны в табл. 1.

На первом этапе (колонка 1) на электронном пучке проходила калибровка черенковского спектрометра *ЧС*, с помощью которой определялся ко-

эффициент C_{11} , связывающий энерговыделение в *ЧС* с амплитудой сигнала ($C_{11} = E_e / \langle A_{k,11} \rangle$, где E_e – средняя энергия электронов в пучке; $\langle A_{k,11} \rangle$ – средняя амплитуда сигнала *ЧС*, который по порядку считался счетчиком под номером $i = 11$; $k = 0, 9, 10$ – число счетчиков *СЧЛС* перед *ЧС*; при $k = 0$ перед *ЧС* счетчики отсутствуют). Итак, на первом этапе, где перед *ЧС* счетчики *СЧЛС* отсутствовали, $C_{11} = E_e / \langle A_{0,11} \rangle$.

На втором этапе (колонка 2) перед *ЧС* помещалось 9 счетчиков *СЧЛС* и определялись средние амплитуды сигналов $\langle A_{9,i} \rangle$ в *СЧЛС* (i – номер счетчика *СЧЛС* по пучку; $i = 1, 2, \dots, 9$). В этом случае среднее энерговыделение ливня в *ЧС* определялось как $\langle E_{9,11} \rangle = \langle A_{9,11} \rangle C_{11}$.

На третьем этапе (колонка 3) к 9 счетчикам *СЧЛС* добавлялся еще один счетчик и определялись средние амплитуды сигналов в *СЧЛС* ($\langle A_{10,i} \rangle$; $i = 1, 2, \dots, 10$), среднее энерговыделение в *ЧС* ($\langle E_{10,11} \rangle = \langle A_{10,11} \rangle C_{11}$) и суммарное среднее энерговыделение в десяти счетчиках *СЧЛС* ($\langle \Delta E \rangle = E_e - \langle E_{10,11} \rangle$).

На четвертом этапе (колонка 4) определялся максимум каскадной кривой среднего энерговыделения ливня в *СЧЛС*. Начиная с $i = 2$ определялся знак разности средних амплитуд, представленных в колонках 2 и 3 ($\langle \Delta A_i \rangle = \langle A_{10,i} \rangle - \langle A_{9,i} \rangle$; $i = 2, 3, \dots, 10$). Максимум каскадной кривой при $E_e = 26$ и 28 ГэВ приходится на $\approx 7.5X_0$ или на 8-й счетчик *СЧЛС*. В колонках 2 и 3 это счетчики с номерами $i = 9$ и $i = 8$ соответственно. Поэтому для колонки 3 $\langle \Delta A_i \rangle \geq 0$ при $i \leq 8$ и $\langle \Delta A_i \rangle < 0$ при $i > 8$, т.е.

Таблица 2. Формулы для определения относительной амплитуды счетчиков *СЧЛС* при калибровке *СЧЛС* и *ЧС* “методом сдвижки каскадной кривой” ($E_e = 26$ ГэВ)

Последовательность вычислений	Диапазоны	i	Формула
1	Максимум каскадной кривой	8	$\langle A_{9,i}^{\text{отн}} \rangle = \langle A_{10,i}^{\text{отн}} \rangle = 1$
2	До максимума каскадной кривой	7–2	$\langle A_{9,i}^{\text{отн}} \rangle = (\langle A_{9,i} \rangle / \langle A_{10,i+1} \rangle) \langle A_{10,i+1}^{\text{отн}} \rangle$ $\langle A_{9,i}^{\text{отн}} \rangle = \langle A_{10,i}^{\text{отн}} \rangle$
3	За максимумом каскадной кривой	9, 10	$\langle A_{10,i}^{\text{отн}} \rangle = (\langle A_{10,i} \rangle / \langle A_{9,i-1} \rangle) \langle A_{9,i-1}^{\text{отн}} \rangle$ $\langle A_{10,i}^{\text{отн}} \rangle = \langle A_{9,i}^{\text{отн}} \rangle$

каскадная кривая сдвинулась на $1X_0$, равную толщине счетчика *СЧЛС*.

На пятом этапе (колонка 5) происходил переход от амплитуд счетчиков, выраженных в каналах аналого-цифрового преобразователя, к относительным амплитудам или к амплитудам, нормированным на амплитуду счетчика, на который приходится максимум каскадной кривой. Переход к относительным амплитудам осуществлялся следующим образом: амплитуда сигнала со счетчика, в котором находился максимум ливня, принималась за единицу ($\langle A_{9,i}^{\text{отн}} \rangle = \langle A_{10,i}^{\text{отн}} \rangle = 1; i = 8$); тогда амплитуда сигналов в других счетчиках представлялась в долях от максимума каскадной кривой по формулам, представленным в табл. 2. Результаты нормирования представлены в колонках 4 и 5 табл. 1.

На шестом этапе (колонка 6) определялась энергия ливня, выделившаяся в каждом счетчике *СЧЛС*. Для этого суммированием относительных амплитуд колонки 3 определялась суммарная относительная амплитуда в десяти счетчиках *СЧЛС* ($\langle A \rangle = \sum_{i=1}^{10} \langle A_{10,i}^{\text{отн}} \rangle$), которой соответствовала средняя энергия ливня $\langle \Delta E \rangle$, выделившаяся в *СЧЛС*, определенная на третьем этапе. Далее, по формуле $\langle \Delta E_i \rangle = (\langle \Delta E \rangle / \langle A \rangle) \langle A_{10,i}^{\text{отн}} \rangle$ определялась средняя энергия ливня, выделившаяся в каждом счетчике *СЧЛС* ($i = 1, 2, \dots, 10$).

На седьмом (колонка 7), последнем, этапе определялись коэффициенты C_i , связывающие энерговыделение в счетчиках *СЧЛС* с их амплитудами ($C_i = \langle \Delta E_i \rangle / \langle A_{10,i} \rangle, i = 1, 2, \dots, 10$).

Максимумы каскадных кривых при энергиях электронов и γ -квантов с энергиями около 30 ГэВ, как отмечено выше, приходятся на толщину спектрометра, составляющую $8X_0$. Поэтому использование 10 счетчиков толщиной $1X_0$ и $1.18X_0$ оказывается разумным, поскольку в этом случае развитие электромагнитных ливней можно проследивать до максимума и за максимумом каскадной кривой

вплоть до $10X_0$ при использовании *СЧЛС* и до $\approx 12X_0$ при использовании *ССЛС*.

Суммирование сигналов соседних счетчиков дает возможность увеличивать толщину ячейки спектрометра, а последовательное суммирование сигналов счетчиков – составлять спектрометры толщиной от $1X_0$ до $10X_0$ в случае *СЧЛС* и от $1.18X_0$ до $11.8X_0$ в случае *ССЛС*. Суммирование сигналов с (*СЧЛС* и *ЧС*) и (*ССЛС* и *ЧС*) позволяет составить спектрометры толщинами $25X_0$ и $26.8X_0$ соответственно.

На рис. 4 показаны каскадные кривые развития электромагнитных ливней в *СЧЛС* при энергии электронов $E_e = 26$ ГэВ и $E_e = 28$ ГэВ и калибровочная кривая K , которая снимается без кристалла перед спектрометром. Наличие кристалла перед спектрометром ведет к сдвижке каскадной кривой в сторону начала развития ливня, т.е. в кристалл.

Характер развития ливня от электронов за максимумом каскадной кривой представлен на рис. 5 [3, 5]. На этом рисунке представлено относительное энерговыделение в *ЧС* от толщины конвертора перед ним ($\langle \Delta E_{\text{чс}} \rangle / E_e$, где $\langle \Delta E_{\text{чс}} \rangle$ – среднее энерговыделение в *ЧС*, $E_e = 26$ ГэВ – средняя энергия электронов в пучке). В качестве конверторов выступают счетчики *СЧЛС* и разориентированные кристаллы гранта и вольфрама. Экстраполяция кривой в сторону увеличения толщины конвертора перед *ЧС* показывает, что электромагнитный каскад простирается вплоть до толщины конвертора перед *ЧС* $t_{\text{СЧЛС}} + \text{кристалл} \sim 16X_0$ или до толщины системы кристалл + *СЧЛС* + *ЧС* $\sim 31X_0$.

На рис. 6а показаны каскадные кривые развития электромагнитных ливней в *СЧЛС* для трех энергий γ -квантов. Видно, что каскадные кривые “стандартно” изменяются при увеличении энергии: увеличивается среднее энерговыделение в счетчиках и происходит сдвижка каскадных кривых в глубь *СЧЛС*. Зависимость энерговыделения

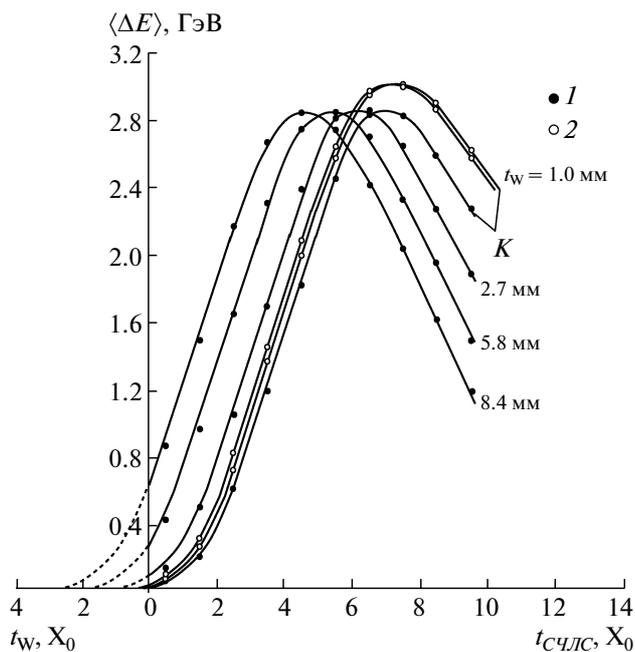


Рис. 4. Каскадные кривые развития электромагнитного ливня в СЧЛС от электронов с энергией $E_e = 26$ ГэВ (1) и $E_e = 28$ ГэВ (2) при разных толщинах разориентированных кристаллов вольфрама. K – калибровочная кривая; $\langle \Delta E \rangle$ – средняя энергия ливня, выделившаяся в счетчике СЧЛС.

в максимуме каскадных кривых представлена на рис. 6б ($t_{\max} \sim \ln E_\gamma$, где t_{\max} – глубина СЧЛС, на которую приходится максимум каскадной кривой; E_γ – энергия γ -квантов) [9].

Последовательное суммирование сигналов счетчиков СЧЛС дает возможность регистрировать энерговыделение в детекторах разной толщины и построить интегральную кривую. На рис. 7а показаны интегральные кривые развития электромагнитного ливня в системе СЧЛС и ЧС при энергии электронов $E_e = 26$ ГэВ (K – калибровочная кривая, т.е. конвертор перед спектрометром отсутствует). При наличии конвертора перед системой также видна сдвигка кривой к началу развития ливня. Интегральные кривые развития электромагнитного ливня в системе СЧЛС и ЧС для трех энергий γ -квантов показаны на рис. 7б (перед сборкой находился разориентированный кристалл вольфрама толщиной 1 мм).

На рис. 7а виден и “недобор” энергии ливня системой СЧЛС и ЧС (ΔE) относительно энергии электрона первичного пучка при наличии перед ней конвертора ($\Delta E = E_e - E'_e$, где E_e – энергия электрона первичного пучка, E'_e – энергия электрона, определенная системой СЧЛС и ЧС). Зависимость энергии ливня, “недобранной” системой СЧЛС и ЧС от толщины конвертора показана на рис. 8. “Недобор” ($\Delta E = \Delta E_W + \Delta E_{\text{рас}}$) состоит из

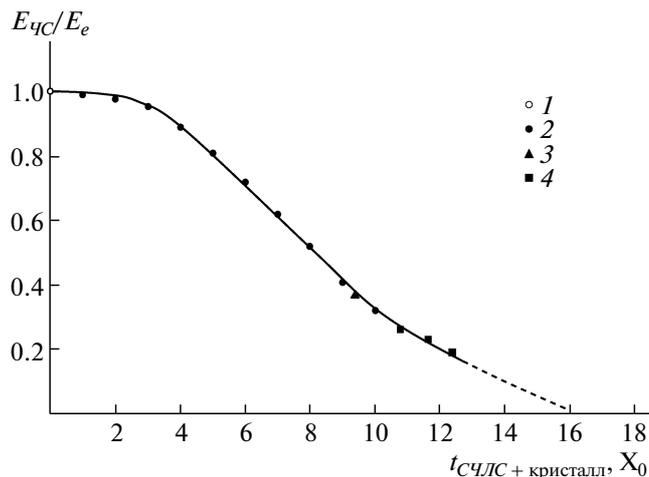


Рис. 5. Зависимость отношения энергии, выделившейся в ЧС ($E_{ЧС}$), к энергии электронов в пучке ($E_e = 26$ ГэВ) от толщины конвертора, стоящего перед ЧС: 1 – конвертор отсутствует; 2 – СЧЛС; 3 – разориентированный кристалл ($\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$) толщиной 50 мм; 4 – разориентированные кристаллы вольфрама толщиной 2.7, 5.8 и 8.4 мм.

поглощения части ливня кристаллом (ΔE_W) и многократным рассеянием ливня на воздухе между кристаллом и СЧЛС ($\Delta E_{\text{рас}}$; расстояние между кристаллом и СЧЛС составляло 65 см). Выход ливня через боковые стороны СЧЛС и ЧС, а также выход части ливня через заднюю часть ЧС учтены при калибровке спектрометра.

Зависимость относительного энергетического разрешения с.л.с. на примере СЧЛС от его толщины и толщины кристаллического конвертора (вольфрам, угол разориентации $\Theta \geq 23$ мрад относительно оси $\langle 111 \rangle$) перед СЧЛС, начиная с толщины СЧЛС $1X_0$ вплоть до толщины системы СЧЛС и ЧС $25X_0$, показана на рис. 9. Из рисунка видно, что вплоть до толщин спектрометров $16\text{--}18X_0$ энергетическое разрешение СЧЛС улучшается независимо от толщины конвертора. Более детально зависимости энергетического разрешения СЧЛС и системы СЧЛС и ЧС от толщины конвертора перед СЧЛС показаны на рис. 10 и рис. 11 [10].

Из рис. 10 видно, что энергетическое разрешение СЧЛС улучшается как с толщиной спектрометра, так и с толщиной конвертора. Спектрометр большой толщины (система СЧЛС и ЧС) имеет наилучшее энергетическое разрешение при отсутствии конвертора, а при увеличении его толщины энергетическое разрешение ухудшается (рис. 11).

Таким образом, для каждой толщины СЧЛС существует толщина конвертора, при которой с.л.с. имеет наилучшее разрешение. Например, для СЧЛС толщиной около $25X_0$, т.е. для СЧЛС и ЧС, энергетическое разрешение наилучшее при отсутствии конвертора.

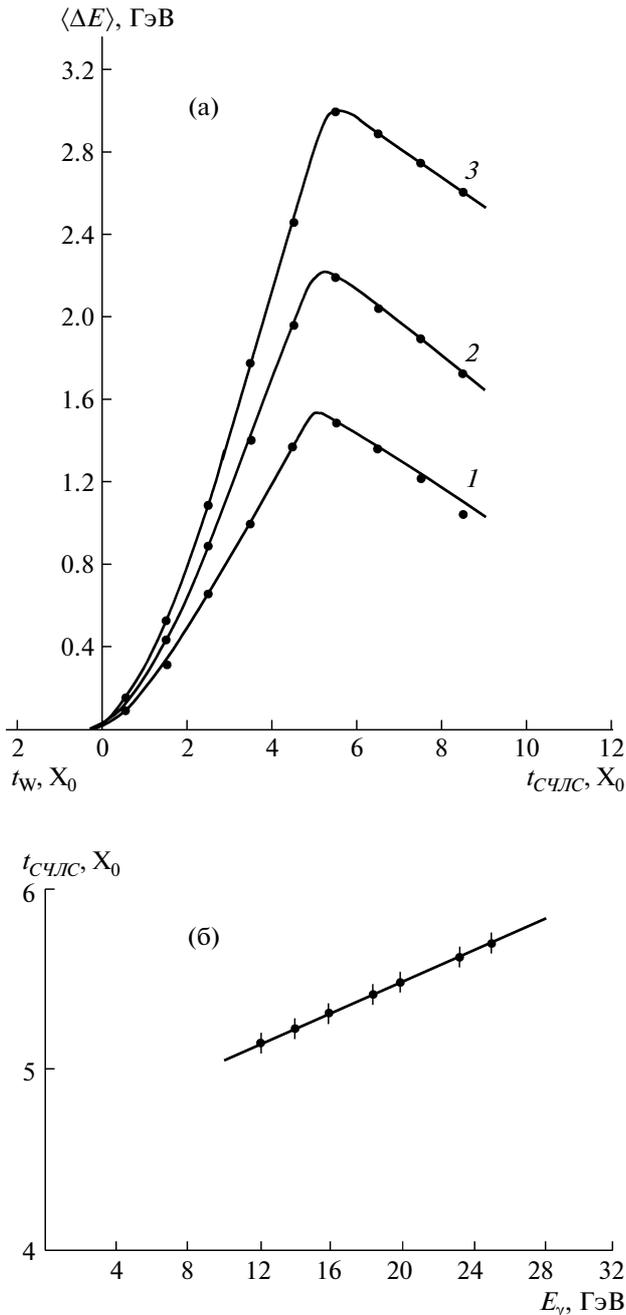


Рис. 6. а – каскадные кривые развития электромагнитного ливня в СЧЛС от γ -квантов ($\langle \Delta E \rangle$ – средняя энергия ливня, выделившаяся в счетчике СЧЛС): 1 – $\langle E_\gamma \rangle = 12$ ГэВ, 2 – $\langle E_\gamma \rangle = 18.5$ ГэВ, 3 – $\langle E_\gamma \rangle = 26$ ГэВ; б – зависимость положения максимума каскадных кривых развития электромагнитного ливня в СЧЛС от энергии γ -квантов. Перед СЧЛС помещен разориентированный кристалл вольфрама толщиной 1 мм.

Энергетические разрешения системы СЧЛС и ЧС, а также ССЛС и ЧС, полученные в результате калибровок, проведенных на пучке электронов с $E_e = 28$ ГэВ (с учетом разрешения пучка), дали следующие результаты: $\sigma/E_e = 2.4\%$ для СЧЛС и ЧС, $\sigma/E_e = 4.3\%$ для ССЛС и ЧС.

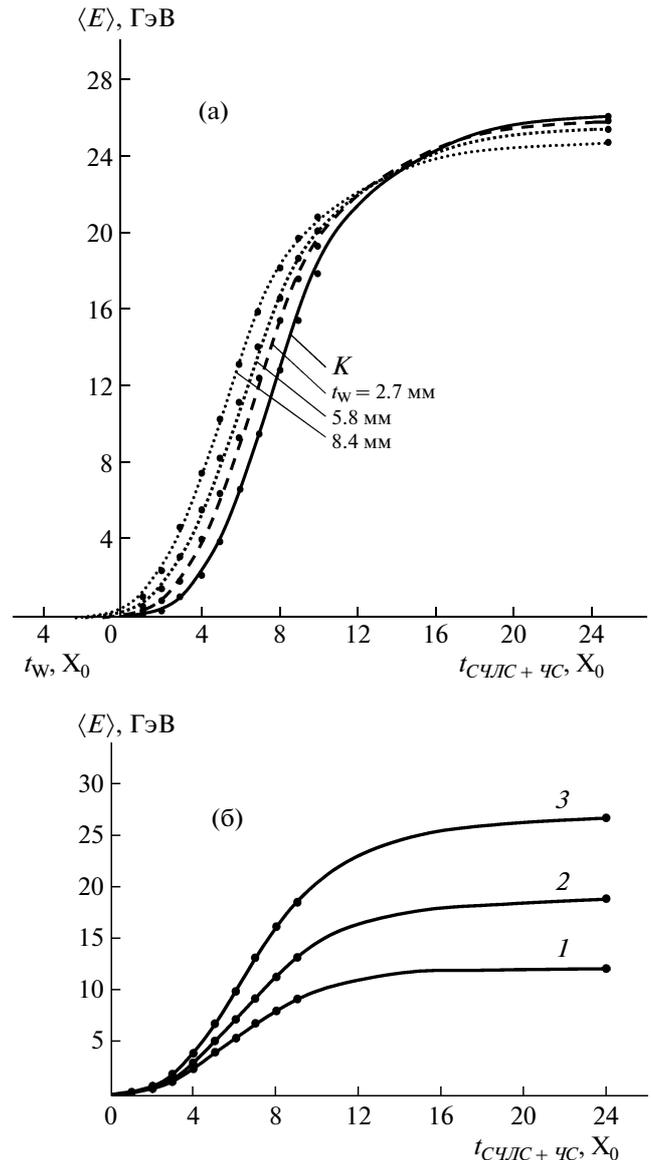


Рис. 7. Интегральные кривые развития электромагнитного ливня в СЧЛС и ЧС: а – от электронов с энергией $E_e = 26$ ГэВ при разных толщинах разориентированных кристаллов вольфрама (К – калибровочная кривая, т.е. кристалл перед СЧЛС отсутствует); б – от γ -квантов (перед СЧЛС помещен разориентированный кристалл вольфрама толщиной 1 мм; 1 – $\langle E_\gamma \rangle = 12$ ГэВ, 2 – 18.5 ГэВ, 3 – 26.6 ГэВ). $\langle E \rangle$ – средняя энергия ливня, зарегистрированная спектрометром.

Это значит, что система СЧЛС и ЧС имеет “стандартное” разрешение, характерное для детекторов такого типа – черенковских детекторов, энергетическое разрешение которых ограничивается статистикой фотоэлектронов.

Система ССЛС и ЧС имеет разрешение в ≈ 2 раза лучше, чем разрешение подобных детекторов типа “сэндвич” с толщиной свинцовых пластин 1–2 мм и сцинтилляционных пластин 5 мм. Улуч-

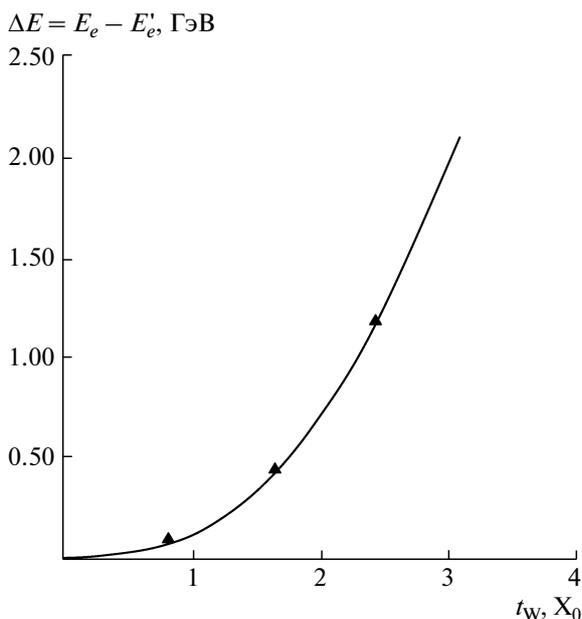


Рис. 8. Разность энергии (ΔE) электрона первичного пучка (E_e) и энергии (E'_e), зарегистрированной системой СЧЛС и ЧС, в зависимости от толщины разориентированного кристалла вольфрама при энергии электронов $E_e = 26$ ГэВ.

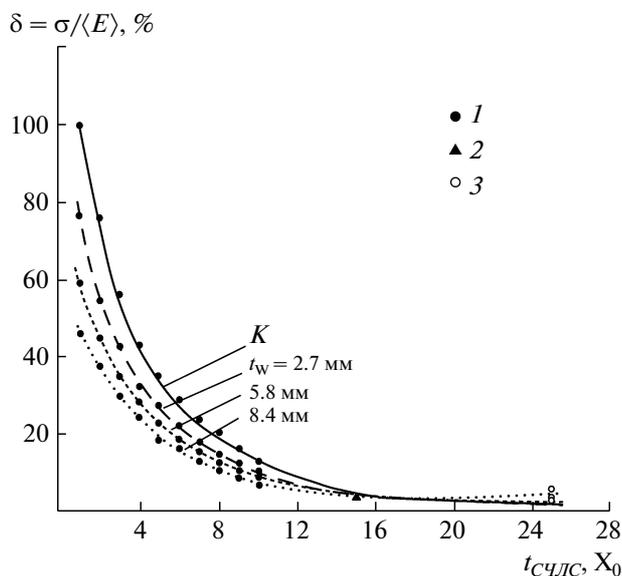


Рис. 9. Зависимость относительного разрешения СЧЛС, СЧЛС и ЧС от толщины спектрометра при разных толщинах разориентированных кристаллов вольфрама (σ – среднеквадратичное разрешение энергетического спектра СЧЛС; $\langle E \rangle$ – среднее энерговыделение в счетчике СЧЛС соответствующей толщины; K – калибровочная кривая, т.е. кристалл перед СЧЛС отсутствует; $E_e = 26$ ГэВ): 1 – СЧЛС; 2 – ЧС [7]; 3 – СЧЛС и ЧС.

шение связано с регистрацией ЧС части ливня, выходящего из ССЛС. ЧС “исключает” вклад в полное разрешение системы ССЛС и ЧС сэмплинг-флуктуаций, флуктуаций длин треков и флуктуаций Ландау, которые могли бы быть, если вместо ЧС использовался свинцово-сцинтилляционный спектрометр такой же толщины.

Составные ливневые спектрометры показали возможность с хорошей точностью регистрировать продольное развитие электромагнитных ливней от его начала до полного затухания.

Методика калибровки спектрометров “сдвижкой каскадной кривой” позволила правильно “восстановить” каскадную кривую в с.л.с. использованием только одной энергии электронов, что важно при проведении экспериментов с ограниченным диапазоном энергий первичных частиц.

Система с.л.с. совместно с черенковским спектрометром ЧС, который также можно рассматривать как часть с.л.с., имеет хорошее энергетическое разрешение.

Исследованы зависимости энергетического разрешения от толщины с.л.с. и толщины конвертора перед с.л.с. Определено, что для каждой толщины

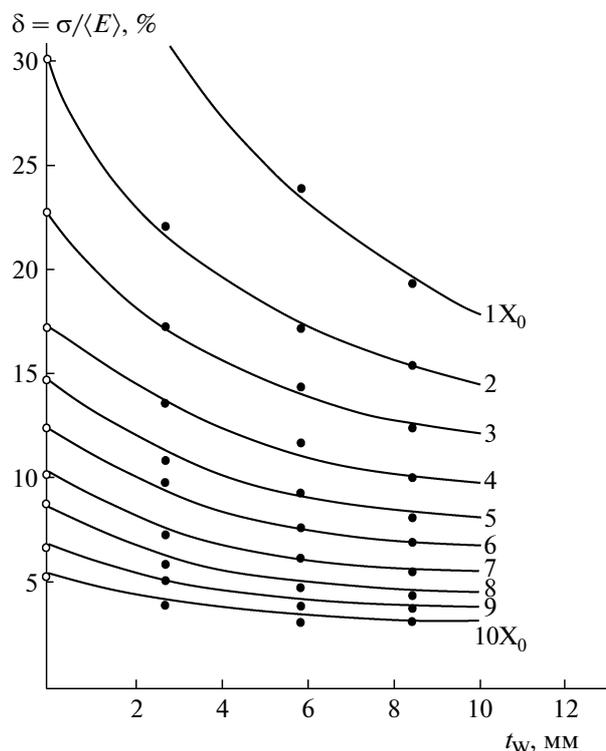


Рис. 10. Зависимость относительного энергетического разрешения СЧЛС от толщины разориентированного кристалла вольфрама ($T_w = 293$ К; толщина СЧЛС указана возле кривых в радиационных длинах (X_0); $\langle E \rangle$ – среднее энерговыделение в счетчике СЧЛС соответствующей толщины; $E_e = 26$ ГэВ; – кристалл перед СЧЛС отсутствует) [9].

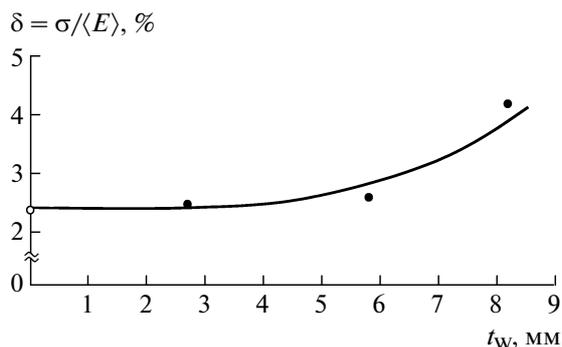


Рис. 11. Зависимость относительного энергетического разрешения СЧЛС и ЧС от толщины разориентированного кристалла вольфрама ($\langle E \rangle$ – среднее энерговыделение в СЧЛС и ЧС общей толщиной $25X_0$; $E_e = 26$ ГэВ; о – кристалл перед СЧЛС и ЧС отсутствует).

с.л.с. существует толщина конвертора, при которой энергетическое разрешение с.л.с. наилучшее.

Конструкция и характеристики с.л.с. дают возможность использовать их совместно с другими спектрометрами и применять их в качестве спектрометров направленного действия в экспериментах, в которых требуются компактные спектрометры.

Авторы благодарны **Е.И. Тамму** за поддержку работы и благодарят В.И. Сергиенко за практическое руководство и организацию работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басков В.А., Ким В.В., Коноров И.В., Сергиенко В.И., Хабло В.А. // ПТЭ. 1990. № 5. С. 58.
2. Басков В.А., Ганенко В.Б., Гуцин В.А. и др. // ПТЭ. 1992. № 5. С. 52.
3. Baskov V.A., Khablo V.A., Kim V.V. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 1998. V. B145. P. 92.
4. Басков В.А., Ким В.В., Лучков Б.И. и др. Препринт ФИАН № 9. М., 2005.
5. Басков В.А., Ким В.В., Лучков Б.И. и др. Препринт ФИАН № 31. М., 2006.
6. Baskov V.A., Khablo V.A., Kim V.V., Sergienko V.I. // Nucl. Instrum. and Methods. 1990. V. A297. P. 329.
7. Белоусов А.С., Ваздик Я.А., Малиновский Е.И. и др. Препринт ФИАН № 266. М., 1986.
8. Александров Ю.А., Баранов С.С., Белоусов А.С. и др. Препринт ФИАН № 31. М., 1979.
9. Калиновский А.Н., Мохов Н.В., Никитин Ю.П. Прохождение частиц высоких энергий через вещество. М.: Энергоатомиздат, 1985.
10. Басков В.А., Говорков Б.Б., Ким В.В. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 1992. № 9, 10. С. 41.