

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ П.Н.ЛЕБЕДЕВА**

ПРЕПРИНТ

**В.А. БАСКОВ, В.В. КИМ, Б.И. ЛУЧКОВ,  
В.Ю. ТУГАЕНКО, В.А. ХАБЛО**

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ  
ОРИЕНТИРОВАННОГО  
КРИСТАЛЛИЧЕКОГО КОНВЕТРОРА  
НА ОТКЛИК СПЕКТРОМЕТРА**

**В ПЕЧАТЬ, В СВЕТ!**

**Зам. директора ФИАН,  
док. физ. - мат. наук**

**Гиппиус А.А.**

**МОСКВА 2011**

# ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОРИЕНТИРОВАННОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КОНВЕРТОРА НА ОТКЛИК СПЕКТРОМЕТРА

В.А. Басков\*, В.В. Ким, Б.И. Лучков<sup>1</sup>, В.Ю. Тугаенко<sup>1</sup>, В.А. Хабло

## Аннотация

Охлаждение  $1\text{ мм}$  ориентированного вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  кристаллического вольфрамового конвертора перед электромагнитным спектрометром толщиной  $25X_0$  и регистрирующего ливни от электронов  $28\text{ ГэВ}$  до температуры  $77^\circ\text{К}$  приводит к уменьшению радиационной длины кристалла на  $\sim 30\%$ , сдвиге каскадной кривой развития ливня в спектрометре на  $\sim 7\%$  и улучшает энергетическое разрешение спектрометра на  $\sim 5\%$  по сравнению с аналогичными параметрами при температуре кристалла  $293^\circ\text{К}$ .

## INFLUENCE TEMPERATURE FOCUSED CRYSTAL CONVERTER ON THE RESPONSE OF THE SPECTROMETER

V.A. Baskov\*, V.V. Kim, B.I. Luchkov<sup>1</sup>, V.Yu. Tugaenko<sup>1</sup>, V.A. Khablo

## Abstract

Cooling of  $1\text{ mm}$  crystal tungsten converter aligned along  $\langle 111 \rangle$  an axis before an electromagnetic spectrometer thickness  $25X_0$  and registering showers from electrons  $28\text{ GeV}$  up to temperature  $77^\circ\text{K}$  leads to reduction of radiating length of a crystal by  $\sim 30\%$ , shifting a cascade curve of development of a showers in a spectrometer on  $\sim 7\%$  and improves the energy resolution of a spectrometer to  $\sim 5\%$  in comparison with similar parameters at temperature of a crystal  $293^\circ\text{K}$ .

*1* - 115549, г. Москва, Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ” (Moscow, National research nuclear university (MEPhI))

\* baskov@x4u.lebedev.ru

Отклик спектрометра, регистрирующего электромагнитные ливни от электронов (позитронов) и  $\gamma$ -квантов с энергией  $E \geq 0.1 \text{ ГэВ}$  (“стандартные” ливни), определяется интегральной и каскадной кривыми развития ливня, которые, в свою очередь, определяют основные свойства спектрометра (продольный и поперечный размеры, энергетическое разрешение). На отклик спектрометра, регистрирующего “стандартные” ливни, влияют в основном два фактора: энергия частицы и свойства рабочего вещества спектрометра [1,2].

Отклик спектрометра, регистрирующего электромагнитные ливни, развивающиеся в поле оси или плоскости ориентированного кристалла (“аномальные” ливни), отличается от отклика спектрометра, регистрирующего “стандартные” ливни. В этом случае, на отклик спектрометра дополнительно влияют: тип кристалла (потенциал оси или плоскости, вдоль которой развивается ливень), степень ориентации относительно оси или плоскости, температура кристалла [3,4].

Теоретические работы, связанные с изучением электродинамических процессов излучения электронов (позитронов) и рождения  $e^+e^-$  пар  $\gamma$ -квантами высоких энергий при углах входа в кристаллы  $\Theta \ll V/mc^2$  предсказали зависимость процессов от температуры [3]. Экспериментальные работы, выполненные в *ФИАНе*, подтвердили, что вероятность рождения  $e^+e^-$  пар  $\gamma$ -квантами со средней энергией  $\langle E_\gamma \rangle = 18 \text{ ГэВ}$  и выход величины излучения электронами с энергией  $E = 28 \text{ ГэВ}$  в области *ПСИ* при охлаждении ориентированного 1 мм кристалла вольфрама с температуры  $T_1 = 293^\circ\text{K}$  до  $T_2 = 77^\circ\text{K}$  возрастают на  $\sim 15\%$  [5]. Тем не менее, поведение “аномальных” ливней в ориентированном кристалле и степень изменения отклика спектрометра, регистрирующего ливни, при изменении температуры кристалла оставалось неясным.

Данная работа представляет экспериментальные результаты исследований “аномальных” ливней и отклика электромагнитного спектрометра с конвертором из ориентированного кристаллического вольфрамового конвертора от температуры конвертора.

Работа была выполнена на электронном канале ускорителя *ИФВЭ* на уста-

новке “Каскад” [4,6]. В качестве конвертора использовался кристалл вольфрама толщиной  $1\text{ мм}$ , ориентируемый вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  (радиационная длина вольфрама  $X_0 = 3.5\text{ мм}$ ). Кристалл считался ориентированным при  $\Theta_0 = 0$  и разориентированным (аморфным) при  $\Theta_p \geq 20\text{ мрад}$ . Мозаичность кристалла составляла  $1\text{ мрад}$ . Для регистрации ливней использовался спектрометр, состоящий из составного черенковского ливневого спектрометра (СЧЛС) (10 независимых радиаторов толщиной  $1X_0$ ) и черенковского спектрометра (ЧС) (толщиной  $15X_0$ ). Исследовались характеристики ливней, выходящих из ориентированного кристалла, и отклик спектрометра, регистрирующего эти ливни, при комнатной температуре кристалла  $T_1 = 293^\circ\text{K}$  и при температуре жидкого азота  $T_2 = 77^\circ\text{K}$ .

На рис. 1 представлены каскадные кривые развития электромагнитного ливня в СЧЛС от электронов при разных температурах разориентированного (зависимости 1,2) и ориентированного (зависимости 3,4) кристаллического конвертора перед СЧЛС ( $K$  – калибровочная кривая, полученная при отсутствии перед СЧЛС кристаллического конвертора). Разориентированный конвертор при  $T_1$  перед СЧЛС сдвигает каскадную кривую развития электромагнитного ливня к началу развития в кристалл на величину толщины кристалла (зависимость 1). Ориентация кристалла при  $T_1$  сдвигает каскадную кривую ещё больше в сторону начала развития ливня (зависимость 3) [4]. Охлаждение разориентированного конвертора до  $T_2$  сдвигает каскадную кривую на  $\approx 0.1X_0$  ( $\approx 1.5\%$ ) в сторону начала развития ливня (зависимость 2). Ориентация охлажденного кристалла до  $T_2$  сдвигает каскадную кривую (зависимость 4) к началу развития на  $\sim 15\%$  относительно зависимости 2 (разориентированный кристалл) или на  $\sim 7\%$  относительно каскадной кривой при ориентации кристалл и  $T_2$  (зависимость 3).

В таблице 1 представлено положения максимума каскадной кривой и величина сдвижки кривой при ориентации и разориентации кристалла при разных температурах. Величина  $\Delta t = t_{\max\text{ п}} - t_{\max\text{ о}}$ , определяющая разность положений максимума каскадной кривой в СЧЛС при ориентированном конверторе ( $t_{\max\text{ п}}$ ) относительно разориентированного ( $t_{\max\text{ о}}$ ), является и величиной, на которую

увеличивается эффективная толщина конвертора  $t_{W\text{эфф}} = t_W + \Delta t$  ( $t_{W\text{эфф}}$  – толщина конвертора при которой происходит наиболее эффективное взаимодействие частиц с кристаллом;  $t_W$  – толщина конвертора при разориентации кристалла).

Увеличение эффективной толщины конвертора  $t_{W\text{эфф}}$  означает уменьшение радиационной длины ориентированного кристалла  $X'_0 = X_0 \cdot (t_W / t_{W\text{эфф}})$  [3-5]. Рис. 2 представляет зависимость радиационной длины кристалла от температуры. Видно, что охлаждение ориентированного конвертора с  $T_1$  до  $T_2$  приводит к уменьшению радиационной длины на  $\approx 30\%$ . Охлаждение разориентированного конвертора с  $T_1$  до  $T_2$  (зависимость 2 на рис. 1), приводит к незначительной сдвиге каскадной кривой и показывает изменение радиационной длины конвертора при данном угле входа частиц в кристалл (зависимость 1 на рис. 2). Изменение радиационной длины кристалла при в этом случае говорит о том, что при температуре  $T_2$  кристалл уже не является разориентированным, то есть указывает на увеличение ширины ориентационной зависимости развития ливня в кристалле.

На рис.3 представлены зависимости среднего энерговыделения ливня в первом счетчике СЧЛС для  $T_1$  и  $T_2$  от угла ориентации конвертора  $\Theta$ , из которого видно, что охлаждении конвертора до  $T_2$  увеличивает ширину ориентационной зависимости на  $\Delta\Theta \approx 1 \text{ мрад}$  (под шириной ориентационной зависимости  $\Delta\Theta$  принимается полная ширина ориентационной зависимости измеряемого параметра ливня (например, энерговыделения) на половине высоты).

Охлаждение конвертора с  $T_1$  до  $T_2$  улучшает энергетическое разрешение спектрометра. На рис. 4 представлены зависимости относительного энергетического разрешения спектрометра СЧЛС+ЧС общей толщиной  $25X_0$  с разориентированным (зависимость 1) и ориентированным конвертором (зависимости 2 и 3) ( $\delta = \sigma / \langle E \rangle$ ,  $\sigma$  - среднеквадратичное разрешение,  $\langle E \rangle$  - средняя энергия ливня, выделившаяся в спектрометре) от энергии электронов  $E = 26$  и  $28 \text{ ГэВ}$  и температуры. Точки (●) зависимости 1 были измерены, для точек (□) на зависимостях 2 и 3 были сделаны оценки. Оценки были произведены следующим образом: разрешение спектрометра СЧЛС+ЧС при разориентированном кристалле определяет

ся как  $\sigma/\langle E \rangle = \alpha + k/E^{1/2} = 0.012 + 0.061/E^{1/2}$  [4,6]. Если предположить, что при ориентации кристалла постоянный член  $\alpha$ , определяющий систематические ошибки измерений спектрометра, не меняется, то коэффициент  $k$  при  $E = 28$  ГэВ и  $T_1$  для зависимости 2 (кристалл ориентирован), с учетом измеренного разрешения  $\sigma/\langle E \rangle = 2.11\%$ , стал равным  $k = 0.048$ , а для  $T_2$  и этой же энергии при измеренном разрешении  $\sigma/\langle E \rangle = 2.00\%$  стал равным  $k = 0.042$  (улучшение разрешения при уменьшении температуры составило  $\sim 5\%$ ). Отсюда относительное энергетическое разрешение при  $E = 26$  ГэВ для  $T_1$  и  $T_2$  составило  $\delta \approx 2.14\%$  и  $2.02\%$  соответственно.

Таким образом, температура ориентированного кристалла влияет на развитие электромагнитных ливней. Уменьшение температуры ориентированного кристалла приводит к усилению эффектов развития электромагнитных ливней в кристалле (увеличению энерговыделения, уменьшению радиационной длины кристалла, увеличению ширины ориентационной зависимости развития ливня) и к изменению отклика спектрометра, регистрирующего электромагнитные ливни, выходящие из кристалла (уменьшению длины продольного развития ливня, улучшению энергетического разрешения). Уменьшение температуры ориентированного кристалла на значительную величину (с комнатной  $293^\circ K$  до температуры жидкого азота  $77^\circ K$ , то есть на  $\sim 200^\circ K$  ( $\sim 70\%$ )) ведет к изменению эффектов развития ливней в зависимости от параметра на  $6\% - 30\%$ . Данные измерения подтверждают ранние измерения зависимости электродинамических процессов от температуры [5] и предсказания работы [3] по усилению ориентационных эффектов от температуры.

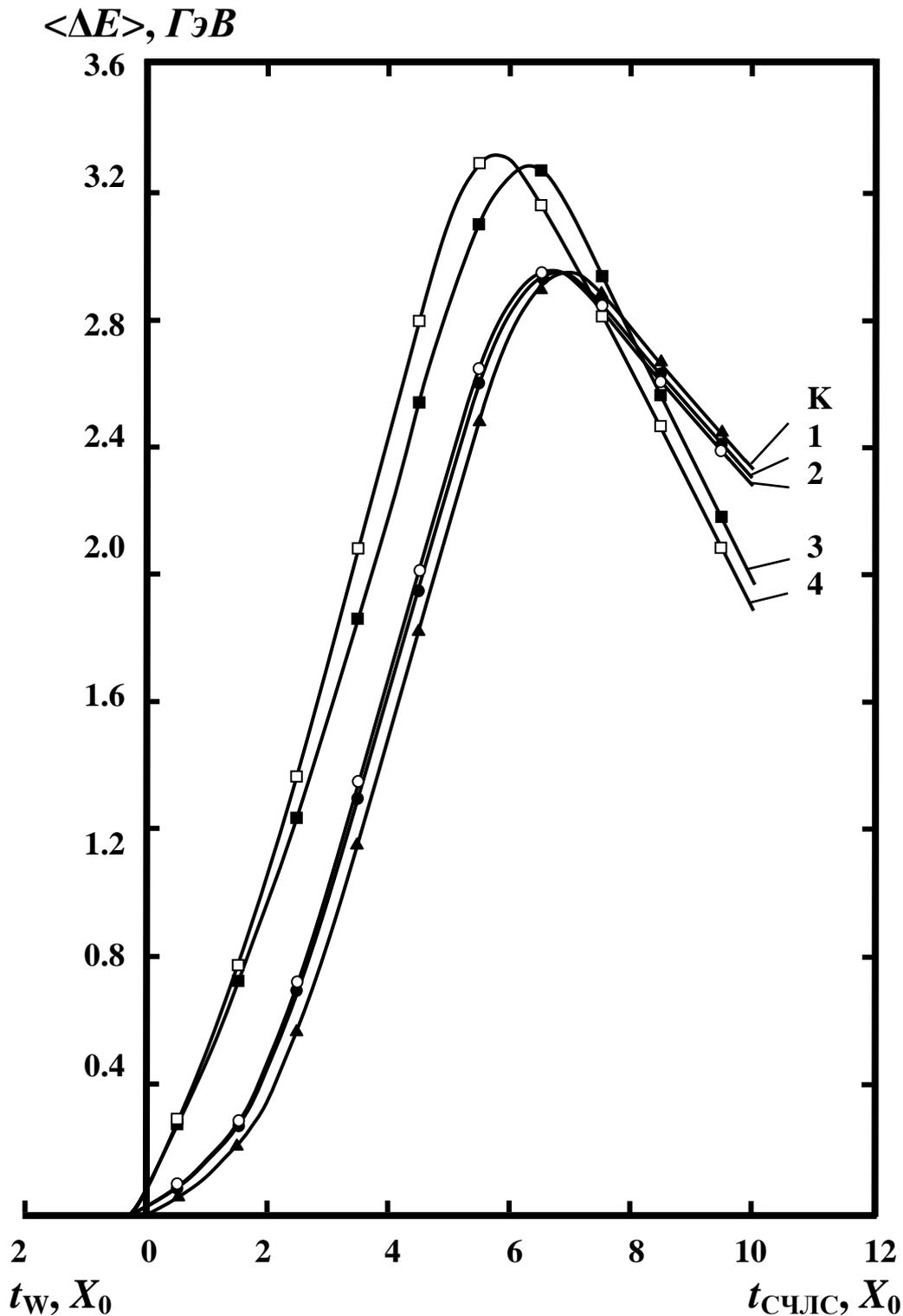
Авторы выражают благодарность Е.И. Тамму и Е.И. Малиновскому за поддержку работы; В.И. Сергиенко за научное руководство и организацию работ.

## ЛИТЕРАТУРА

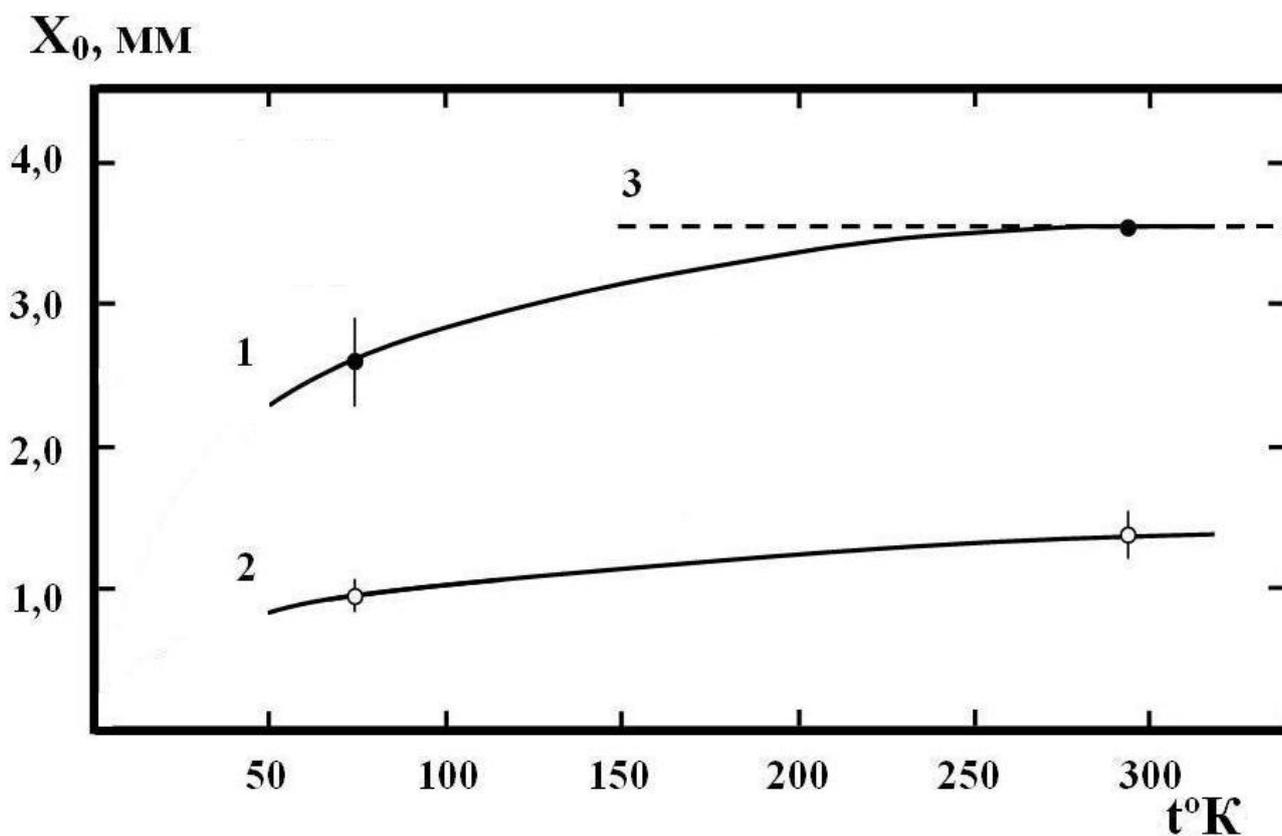
1. *Словинский Б.*, Физика элементарных частиц и атомного ядра (*ФЭЧАЯ*), т.25, выпуск 2, Дубна, 417 (1994).
2. *Калиновский А.Н., Мохов Н.В., Никитин Ю.П.*, Прохождение частиц высоких энергий через вещество, Энергоатомиздат, Москва (1985).
3. *Uggerhoj U.I.*, Reviews of Modern Physics, **V. 77**, 1131 (2005).
4. *Басков В.А., Ким В.В., Лучков Б.И. и др.*, Препринт *ФИАН №31*, Москва (2006).
5. *Басков В.А., Ганенко В.Б., Жебровский Ю.В. и др.*, Тезисы докладов XIX Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, МГУ, 84-86 (1989).
6. *Басков В.А., Белоусов А.С., Ким В.В. и др.*, ПТЭ, **№5**, 66 (2011).

**Таблица 1.** Положение максимума каскадной кривой развития ливня от электронов с  $E = 28$  ГэВ в СЧЛС при разориентированном и ориентированном конверторе перед СЧЛС в зависимости от температуры конвертора.

Температура	Положение максимума каскадной кривой в СЧЛС	$t_{\max p, X_0}$ ( $\Theta_p = 20$ мрад)	$t_{\max o, X_0}$ ( $\Theta_o = 0$ мрад)	$\Delta t = t_{\max p} - t_{\max o, X_0}$
$T_1 = 293^\circ K$ (калибровка)		$7.1 \pm 0,1$		
$T_1 = 293^\circ K$		$6.8 \pm 0,1$	$6,3 \pm 0,1$	$0,5 \pm 0,1$
$T_2 = 77^\circ K$		$6,7 \pm 0,1$	$5,9 \pm 0,1$	$0,8 \pm 0,1$

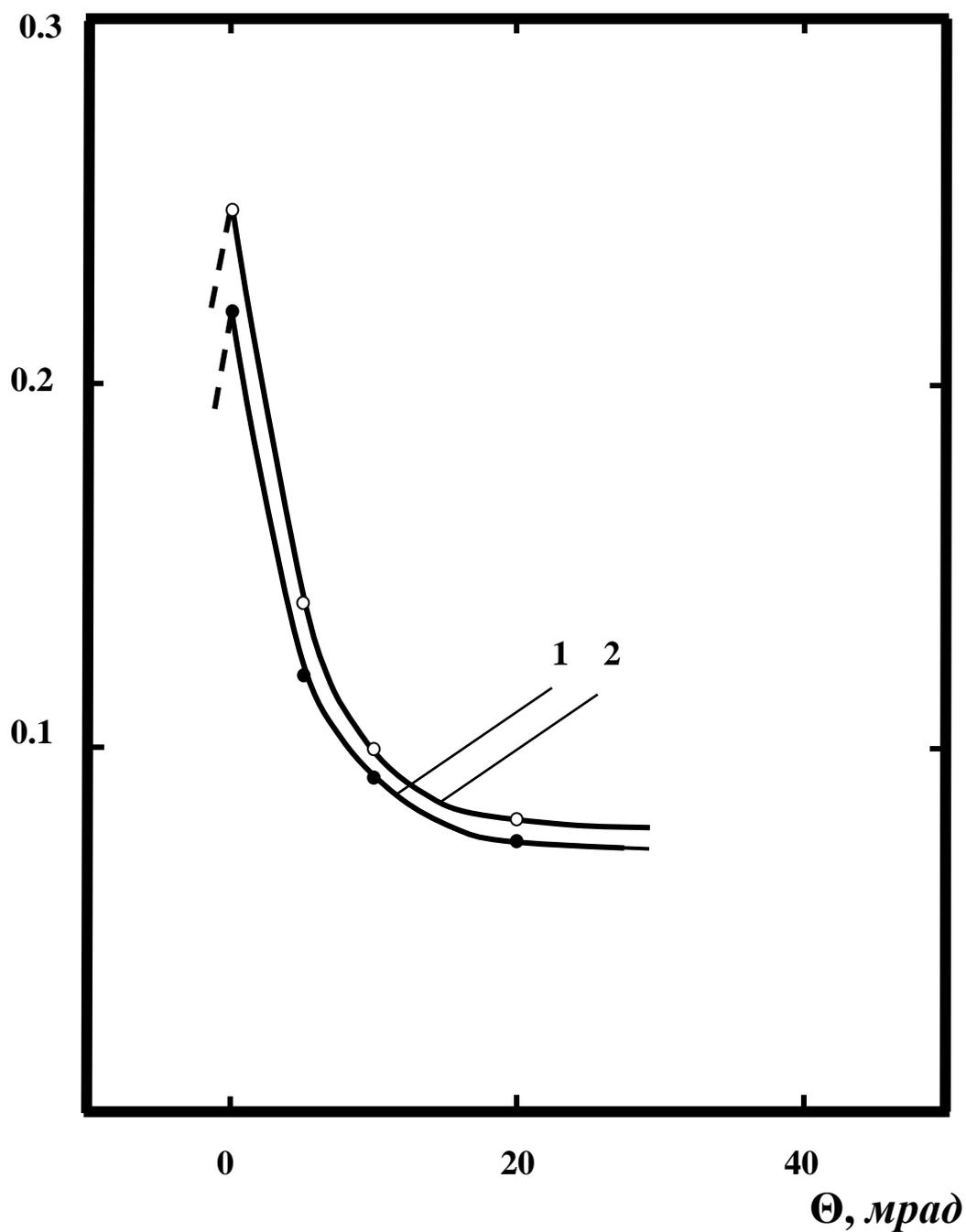


**Рис. 1** Каскадные кривые развития электромагнитного ливня в СЧЛС от электронов с энергией  $E = 28 \text{ ГэВ}$  при разных температурах разориентированного (1,2 -  $\Theta_p = 20 \text{ мрад}$ ) и ориентированного (3,4 -  $\Theta_o = 0 \text{ мрад}$ ) вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  кристаллического  $1 \text{ мм}$  вольфрамового конвертора ( $\langle \Delta E \rangle$  - средняя энергия ливня, выделившаяся в счетчиках СЧЛС;  $K$  - кристалл перед СЧЛС отсутствует;  $t_{\text{W}}$  и  $t_{\text{СЧЛС}}$  - толщины кристалла и СЧЛС в единицах  $X_0$ , соответственно;  $K, 1,3$  -  $T_1 = 293^\circ\text{K}$ ;  $2,4$  -  $T_2 = 77^\circ\text{K}$ ).

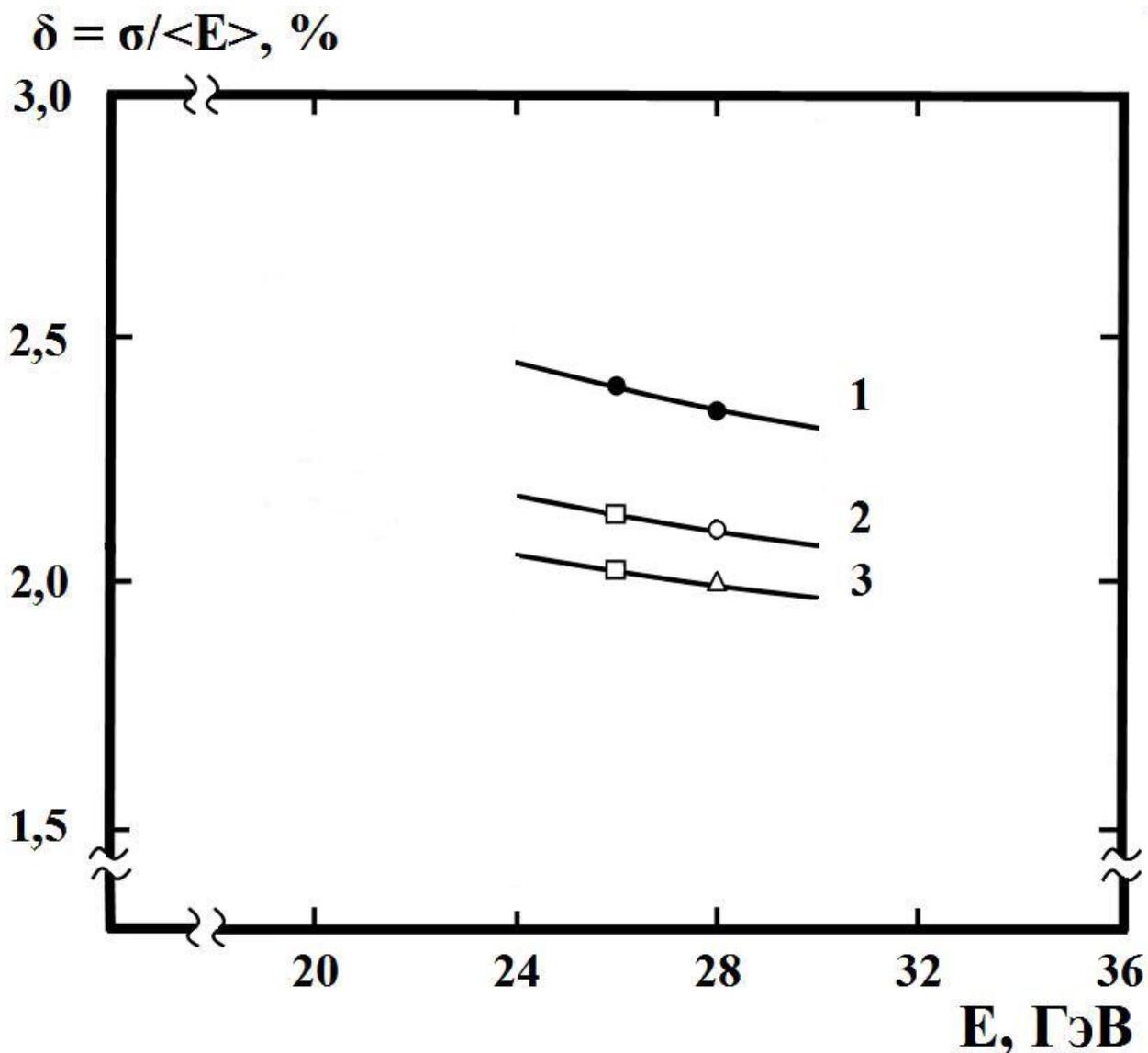


**Рис. 2** Зависимость радиационной длины: 1 - разориентированного ( $\Theta_p = 20$  мрад) и 2 - ориентированного ( $\Theta_o = 0$  мрад) вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  кристаллического 1 мм вольфрамового конвертора перед СЧЛС от температуры при энергии электронов  $E = 28$  ГэВ (3 – аморфный вольфрам).

$\langle \Delta E_1 \rangle, \text{ГэВ}$



**Рис. 3** Зависимость среднего энергосодержания ливня ( $\langle \Delta E_1 \rangle$ ) в первом счетчике СЧЛС от угла ориентации ( $\Theta$ ) конвертора относительно оси  $\langle 111 \rangle$  при энергии электронов  $E = 28 \text{ ГэВ}$ : 1 -  $T_1 = 293^\circ\text{K}$ ; 2 -  $T_2 = 77^\circ\text{K}$ .



**Рис. 4** Зависимость относительного энергетического разрешения спектрометров СЧЛС+ЧС общей толщиной  $25X_0$  ( $\delta = \sigma / \langle E \rangle$ ,  $\sigma$  - среднеквадратичное разрешение,  $\langle E \rangle$  - средняя энергия ливня, выделившаяся в спектрометре) с 1 мм с разориентированным (1), и ориентированным вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  (2 и 3) кристаллическим вольфрамовым конвертором от энергии электронов: 1 и 2 -  $T_1 = 293\text{K}$ ; 3 -  $T_2 = 77\text{K}$  ( $\bullet$ ,  $\circ$ ,  $\Delta$  - измерения;  $\square$  - оценка).