

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

**Физический**  
**ИНСТИТУТ**



*имени*  
*П.Н. Лебедева*

Российской академии наук

**Ф И А Н**

ПРЕПРИНТ

**1**

В.А. БАСКОВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ  
АНОМАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЛИВНЕЙ**

Москва 2014

# ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ АНОМАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЛИВНЕЙ

В.А. Басков

Аннотация

Представлены результаты экспериментальных исследований критической энергии аномальных электромагнитных ливней от электронов в десятки  $ГэВ$ , регистрируемых электромагнитным спектрометром. Обнаружено увеличение критической энергии  $\varepsilon_c$  развития аномального ливня в спектрометре в  $\sim 2$  раза по сравнению с аналогичной величиной в случае развития стандартного ливня, исследовано её поведение от ориентации, толщины и температуры кристалла, формирующего аномальные ливни, энергии электронов.

## THE INVESTIGATION OF THE CRITICAL ENERGY OF ABNORMAL ELECTROMAGNETIC SHOWERS

V.A. Baskov

Abstract

The experimental researches of the critical energy of abnormal electromagnetic showers from electrons to tens  $GeV$  registered by an electromagnetic spectrometer are presented. The increase of the critical energy  $\varepsilon_c$  developments of an abnormal shower in a spectrometer in  $\sim 2$  times in comparison with similar size in case of development of a standard shower is revealed, its behavior from orientation, thickness and temperatures of the crystal forming abnormal showers, energy electrons is investigated.

Отличия отклика спектрометра, регистрирующего *аномальные* электромагнитные ливни, относительно отклика спектрометра регистрирующего *стандартные* электромагнитные ливни распространяется практически на все параметры отклика, в том числе и на величину *критической энергии*  $\varepsilon_c$ , определяющей начало затухания ливня в спектрометре [1-3].

*Критической энергией*, по определению, называется энергия электронов  $E$ , при которой величина удельных радиационных потерь становится сравнимой с величиной удельных ионизационных потерь:  $E = \varepsilon_c = (dE/dx)_{\text{рад}} \approx (dE/dx)_{\text{ион}}$ . *Критическая энергия*  $\varepsilon_c$  зависит от типа вещества. Для оценки  $\varepsilon_c$ , обычно используют приближенную формулу, которая справедлива с погрешностью не более 10% для веществ с атомным номером  $13 \leq Z \leq 92$ :

$$\varepsilon_c \approx 550/Z, \quad (1)$$

где  $Z$  – заряд атомов среды,  $\varepsilon_c$  – энергия в МэВ [4-6].

Данная работа представляет экспериментальные результаты исследования *критической энергии*  $\varepsilon_c$  черенковского спектрометра, регистрирующего *аномальные* электромагнитные ливни, выходящие из ориентированных кристаллов.

В исследованиях были использованы кристаллы толщиной много меньше толщины спектрометра, применяемого для регистрации ливней  $t_{\text{cryst}}(0.28X_0 \div 2.4X_0) \ll t_{\text{spectr}}(25X_0)$  ( $t_{\text{cryst}}$  и  $t_{\text{spectr}}$  – толщины кристаллов и спектрометра, соответственно) [7], поэтому исследовалась *критическая энергия* ливня, развивающегося в основном в спектрометре.

Положение максимума развития электромагнитного ливня в спектрометре без кристалла от энергии электронов  $E$  описывается известным выражением [4-6]:

$$t_{\text{max}} = \ln(E/\varepsilon_c) - c, \quad (2)$$

где  $E$  – энергия электронов в МэВ,  $\varepsilon_c$  – *критическая энергия* черенковского стекла;  $c = 0.5$ .

Положение максимума развития электромагнитного ливня в спектрометре с конвертером из разориентированного (*аморфном*) кристаллического конвертора от энергии электронов  $E$  представляется выражением [3]:

$$t_{\max} = \ln(E/\varepsilon_c) - c - t_{\text{cryst}}. \quad (3)$$

Зависимость 3 смещена относительно зависимости 2 на величину толщины разориентированного кристалла ( $t_{\text{cryst}}$ ) перед спектрометром.

Ориентация кристалла приводит к увеличению *эффективной* толщины кристалла  $t_{\text{eff}}$  перед спектрометром ( $t_{\text{eff}}$  – *эффективная* толщина кристалла, на которой происходит наиболее *эффективное* взаимодействие частиц с кристаллом) и смещению зависимости 2 на соответствующую величину [3]:

$$t_{\max} = \ln(E/E_c) - c - t_{\text{eff}}, \quad (4)$$

где  $t_{\text{eff}} = t_{\text{cryst}} + \Delta t$ , а  $\Delta t = t_{\max d} - t_{\max o}$  является “*добавкой*” к толщине кристалла  $t_{\text{cryst}}$  за счет эффекта ориентации ( $t_{\max d}$  и  $t_{\max o}$  – положение максимума каскадной кривой при разориентированном и ориентированном кристалле, соответственно).

Увеличение *эффективной* толщины кристалла  $t_{\text{eff}}$  при его ориентации не приводит к *реальному* изменению толщины кристалла, что может означать изменение *критической* энергии при развитии *аномального* ливня в кристалле.

Действительно, развитие *аномального* ливня в кристалле идёт в значительной степени по когерентным механизмам излучения  $\gamma$ -квантов электронами (позитронами) и рождения  $e^+e^-$  пар фотонами. В результате, в *аномальном* ливне происходит увеличение энерговыделения по сравнению с энерговыделением в *стандартном* ливне. Дальнейшее развитие *аномального* ливня в спектрометре продолжает частично идти по когерентным механизмам, действия которых простираются на значительную толщину спектрометра и приводят к изменению его отклика. В характере отклика спектрометра появляются ориентационные и температурные зависимости, происходит сдвигка максимума каскадной кривой развития ливня и т. д., в том числе меняется *критическая* энергия [1,2,7].

Таким образом, зависимость 3 модифицируется:

$$t_{\max} = \ln(E/\varepsilon'_c) - c - t_{\text{cryst}}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon'_c$  – модифицированная критическая энергия.

У модифицированной критической энергии  $\varepsilon'_c$  к зависимости от типа вещества добавляются зависимости от энергии электронов, ориентации, температуры и толщины кристалла.

Приравнивая выражения 4 и 5, получаем зависимость  $\varepsilon'_c$  от “добавочной” толщины кристалла за счет степени ориентированности вдоль соответствующей оси или плоскости, так как  $\Delta t = \Delta t(\theta)$  ( $\theta$  – угол ориентации кристалла относительно кристаллографической оси или плоскости):

$$\varepsilon'_c = \varepsilon_c \cdot \exp(\Delta t). \quad (6)$$

Зависимость  $\varepsilon'_c$  от энергии электронов  $E$  для кристаллического вольфрамового конвертора толщиной 1 мм, ориентированного вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  и температуры  $T = 293\text{K}$ , представлена на рис. 1. Видно, что с увеличением энергии электронов критическая энергия увеличивается с табличной величины 15 МэВ при энергии электронов близкой к нулю [8] до ~25 МэВ при энергии электронов около 30 ГэВ. Увеличение составляет ~1.7 раза.

Зависимость  $\varepsilon'_c$  от угла ориентации  $\theta$  относительно кристаллографической оси  $\langle 111 \rangle$  для того же кристалла при температурах  $T_1 = 293\text{K}$  и  $T_2 = 77\text{K}$  и энергии электронов 28 ГэВ представлена на рис. 2. Ширины ориентационных зависимостей составили  $\Delta \theta_1 = \Delta \theta_{293\text{K}} = 7.5 \text{ мрад}$  и  $\Delta \theta_2 = \Delta \theta_{77\text{K}} = 5 \text{ мрад}$ , соответственно. Рисунок также показывает увеличение величины  $\varepsilon'_c$  при уменьшении температуры кристалла с  $\varepsilon'_c \approx 25 \text{ МэВ}$  ( $T_1$ ) до  $\varepsilon'_c \approx 35 \text{ МэВ}$  ( $T_2$ ).

Зависимость  $\varepsilon'_c$  от температуры  $T$  для разных углов ориентации  $\theta$  кристалла представлена на рис. 3. Для всех исследуемых углов  $\varepsilon'_c$  возрастает при уменьшении температуры.

Зависимость  $\varepsilon'_c$  от толщины кристалла  $t_{\text{crist}}$  при энергии электронов 26 ГэВ и температуры  $T_1 = 293\text{K}$  представлена на рис. 4. Если предположить, что в пределах исследуемых толщин кристаллов зависимость имеет пропорциональный характер, то:

$$\varepsilon'_c = at + b, \quad (7)$$

при  $a = 18, b = 15$ .

Можно определить зависимость  $\varepsilon'_c$  от радиационной длины ориентированного кристалла  $X'_0$ . Радиационная длина ориентированного кристалла определяется как  $X'_0 = X_0(t_{\text{cryst}}/t_{\text{eff}}) = X_0(t_{\text{cryst}}/(t_{\text{cryst}} + \Delta t))$ , то есть  $\Delta t = (X_0 - X'_0) \cdot t_{\text{cryst}}/X'_0$ . Отсюда:

$$\varepsilon'_c = \varepsilon_c \cdot \exp((X_0 - X'_0) \cdot t_{\text{cryst}}/X'_0). \quad (8)$$

Поведение  $\varepsilon'_c$  от  $X'_0$ , фактически от  $\Delta t$ , представлено на рис. 1.

Надо отметить, что возрастание *критической* энергии  $\varepsilon'_c$  *аномальных* электромагнитных ливней с увеличением энергии электронов должно происходить до тех пор, пока энергия не достигнет величины, при которой отношение радиационной длины разориентированного кристалла  $X_0$  к радиационной длине ориентированного кристалла  $X'_0$  [1]

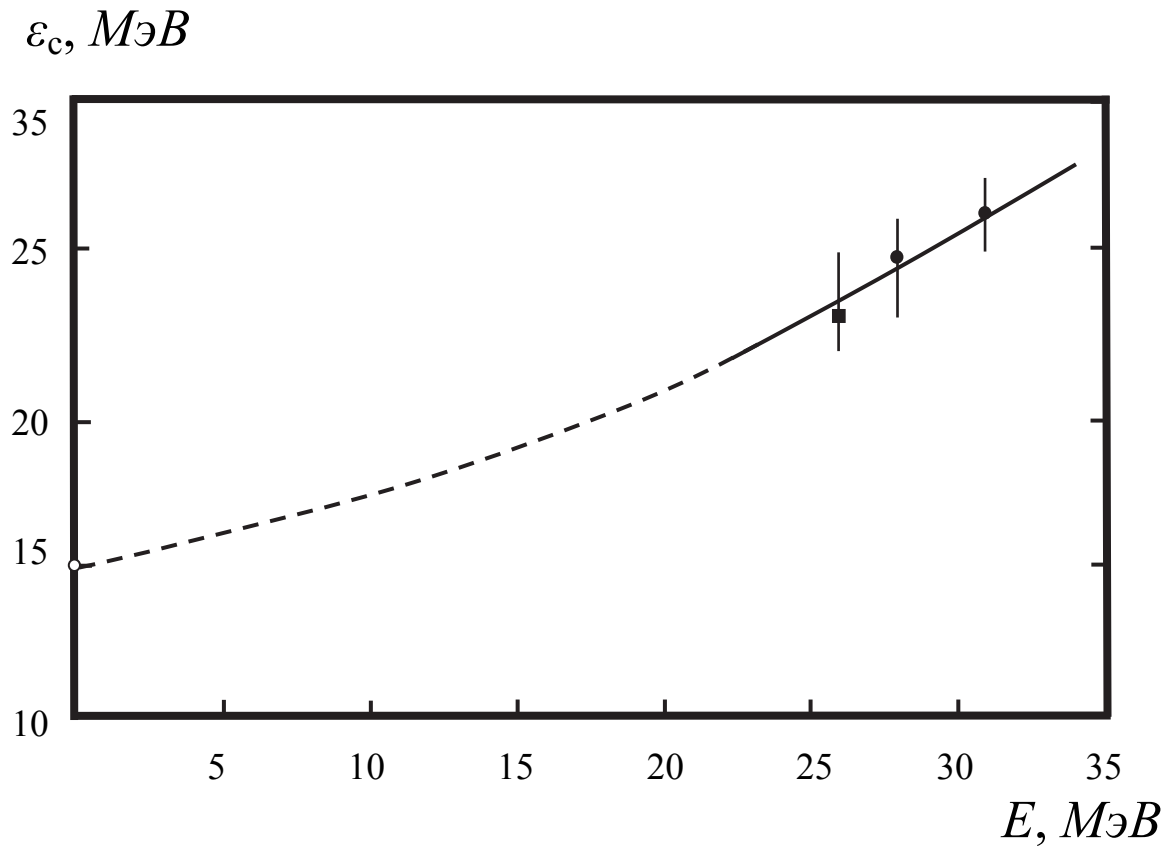
$$X_0/X'_0 = \text{const}. \quad (9)$$

В этом случае,  $X'_0$  достигает минимальной величины, а  $\varepsilon'_c$  максимальной и при дальнейшем увеличении энергии электронов не меняется.

Таким образом, при регистрации *аномальных* электромагнитных ливней от электронов с энергиями в десятки ГэВ *критическая* энергия спектрометра, регистрирующего ливни, возрастает. В пределах исследуемых толщин кристаллов зависимость критической энергии от энергии электронов экспоненциальная, от толщины кристаллического конвертора перед спектрометром пропорциональная. Наблюдается возрастание критической энергии при уменьшении угла ориентации кристаллического конвертора и уменьшении его температуры.

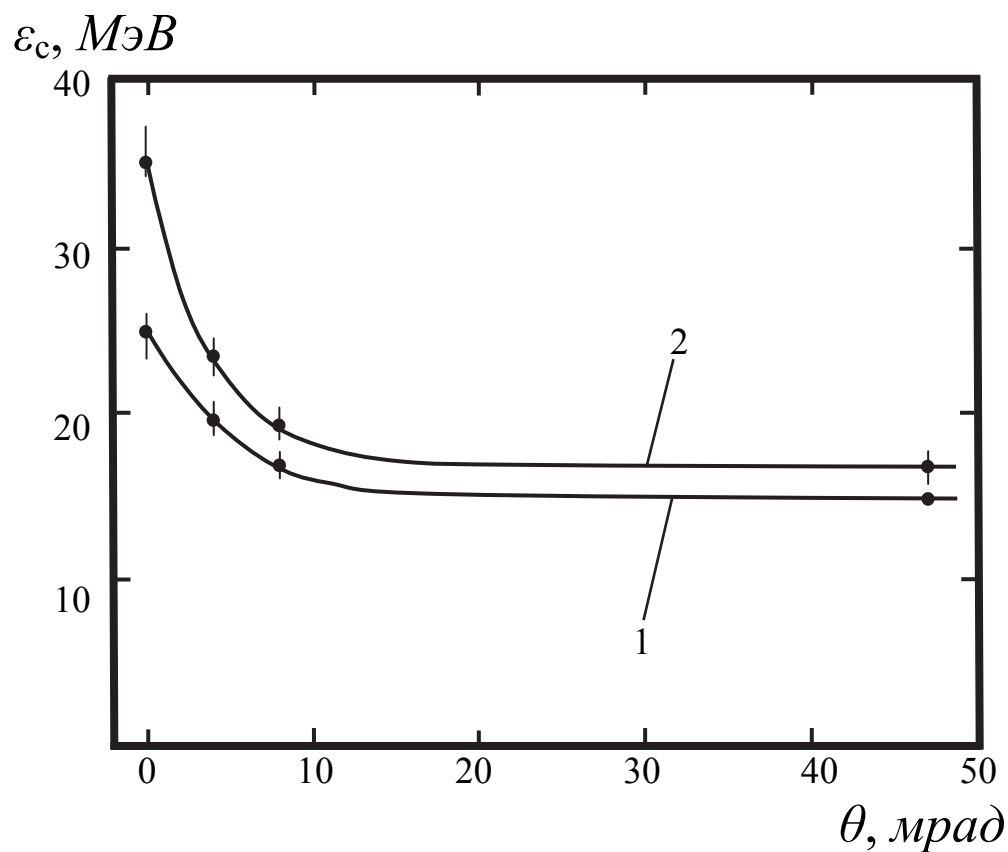
## ЛИТЕРАТУРА

1. *Байер В.Н., Катков В.М., Страховенко В.М.*, Электромагнитные процессы при высокой энергии в ориентированных монокристаллах, издательство “Наука” СО АН СССР, г. Новосибирск, 1989.
2. *Ахиезер А.И., Шульга Н.Ф.*, Электродинамика высоких энергий в веществе, издательство “Наука”, г. Москва, 1993.
3. *Басков В.А.*, Препринт *ФИАН*, 2013, №9, Москва.
4. *Калиновский А.Н., Мохов Н.В., Никитин Ю.П.*, Прохождение частиц высоких энергий через вещество, *Энергоатомиздат*, г. Москва, 1985, С.107.
5. *Barnett V.M., Carone C.D., Groom D.E. et al.*, Particle Physics (Booklet), American Institute of Physics, Available from *LBNL* and *CERN*, July 1996, P. 172.
6. *Словинский Б.*, Физика элементарных частиц и атомного ядра (*ФЭЧАЯ*), Дубна, 1994, т.25, выпуск 2, С. 417.
7. *Басков В.А.*, Краткие сообщения по физике *ФИАН*, №10, 2012, С. 8.
8. *Говорков Б.Б.*, Труды Международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий, Дубна, 1970, 8-12 сентября, С. 389.
9. *Басков В.А.*, Краткие сообщения по физике *ФИАН*, №8, 2013, С. 42.



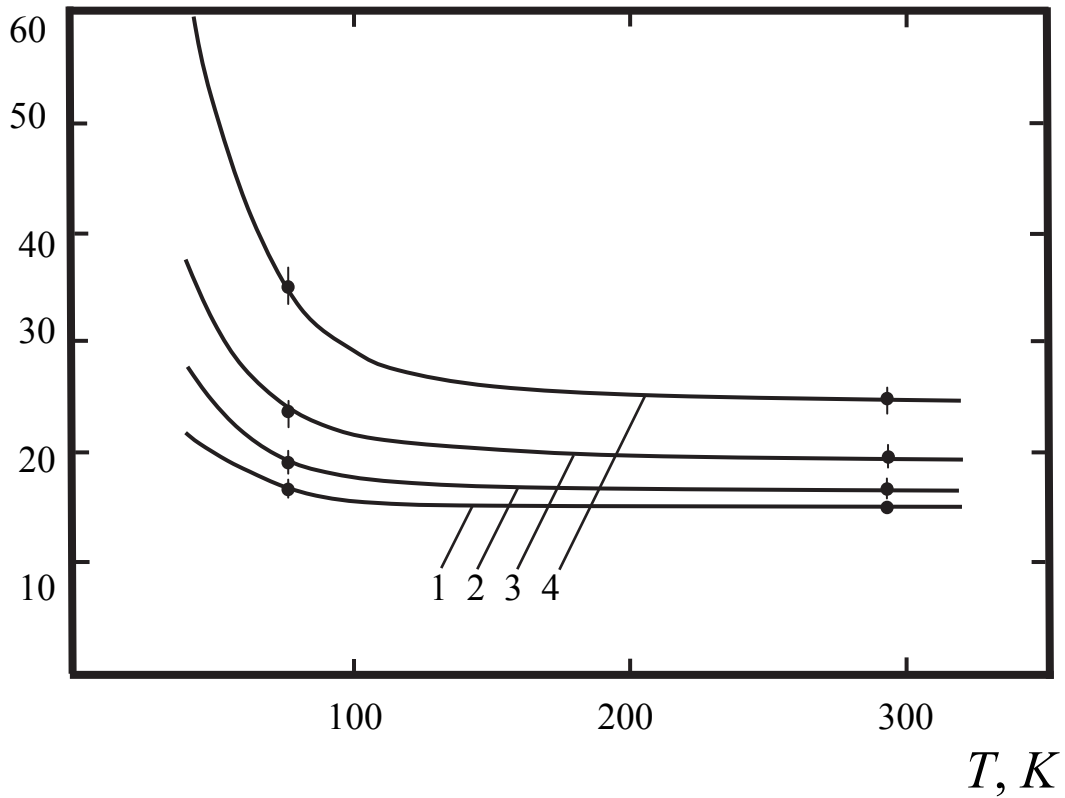
**Рис. 1** Зависимость критической энергии  $\varepsilon_c$  черенковского спектрометра от энергии электронов  $E$  (кристаллический вольфрамовый конвертор толщиной 1 мм, ориентация вдоль оси  $\langle 111 \rangle$ , температура  $T = 293\text{K}$ ;  $\circ$  – табличное значение [8],  $\bullet$  – эксперимент,  $\blacksquare$  – оценка [3,9])





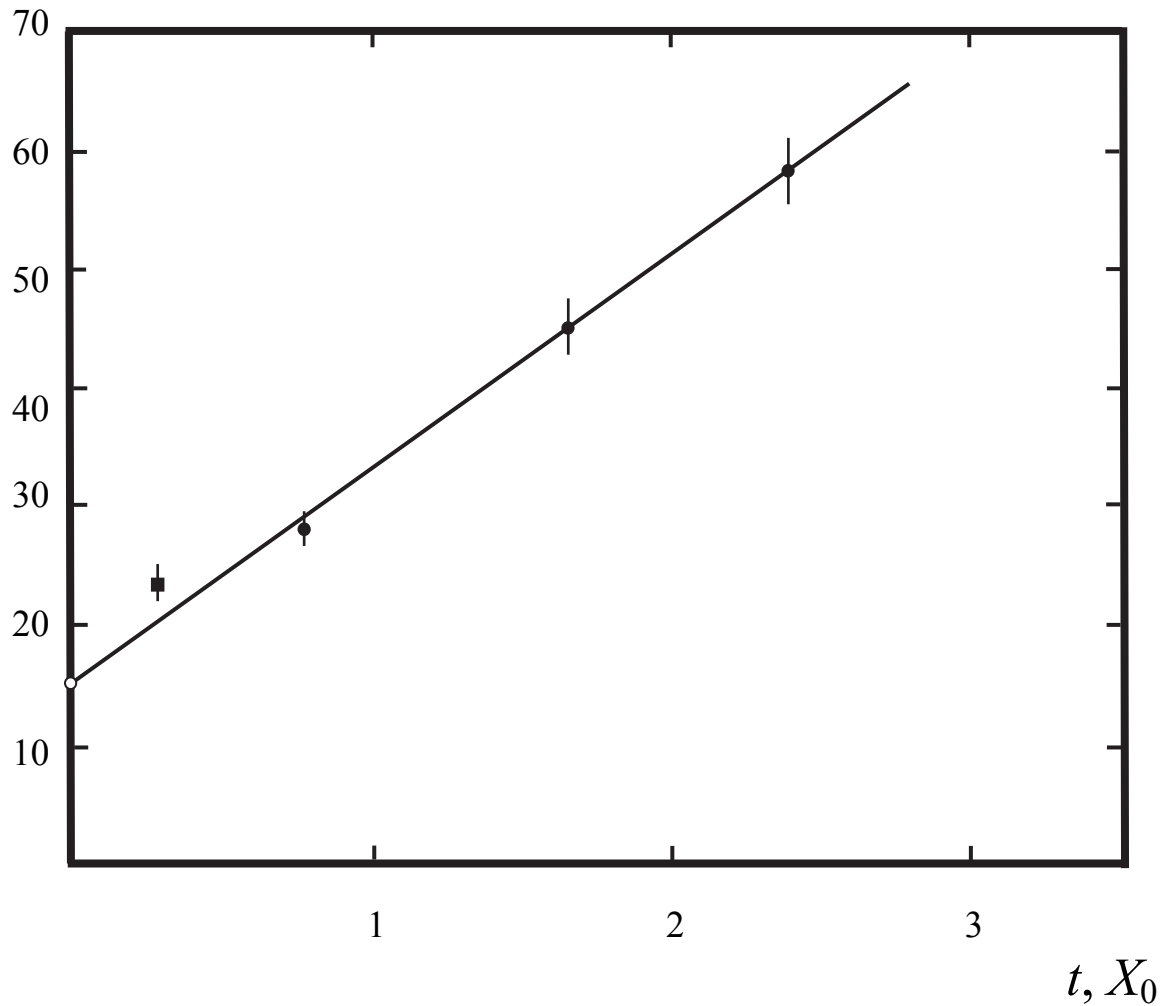
**Рис. 2** Зависимость критической энергии  $\varepsilon_c$  черенковского спектрометра от угла ориентации  $\theta$  кристаллического вольфрамового конвертора толщиной 1 мм относительно оси  $\langle 111 \rangle$  ( $E = 28$  ГэВ; 1 –  $T_1 = 293\text{K}$ , 2 –  $T_2 = 77\text{K}$ ).

$\varepsilon_c, \text{МэВ}$



**Рис. 3** Зависимость критической энергии  $\varepsilon_c$  черенковского спектрометра от температуры  $T$  кристаллического вольфрамового конвертора при различных углах ориентации  $\theta$  относительно оси  $\langle 111 \rangle$  (толщина конвертора  $1 \text{ мм}$ ;  $E = 28 \text{ ГэВ}$ ; 1 –  $\theta = 45 \text{ мрад}$ ; 2 –  $\theta = 8 \text{ мрад}$ ; 3 –  $\theta = 4 \text{ мрад}$ ; 4 –  $\theta = 0 \text{ мрад}$ ).

$\varepsilon_c, \text{МэВ}$



**Рис. 4** Зависимость критической энергии  $\varepsilon_c$  черенковского спектрометра от толщины  $t_{\text{cryst}}$  ориентированных относительно оси  $\langle 111 \rangle$  кристаллов вольфрама при температуре  $T = 293\text{K}$  (○ – табличное значение [8], ■ – оценка [3,9], ● – эксперимент).

Подписано в печать 13.01.2014 г.  
Формат 60x84/16. Заказ № 3. Тираж 140 экз. П.л 0,75.  
Отпечатано в РИИС ФИАН с оригинал-макета заказчика  
119991 Москва, Ленинский проспект, 53. Тел. 499 783 3640