

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

Физический
ИНСТИТУТ
имени
П.Н.Лебедева



Российской академии наук

Ф И А Н

ПРЕПРИНТ

В.А. БАСКОВ

9

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ
ОТКЛИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
СПЕКТРОМЕТРА С КОНВЕРТЕРОМ
ИЗ ОРИЕНТИРОВАННОГО КРИСТАЛЛА**

Москва 2013

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ОТКЛИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СПЕКТРОМЕТРА С КОНВЕРТЕРОМ ИЗ ОРИЕНТИРОВАННОГО КРИСТАЛЛА

В.А. Басков

Аннотация

Представлены экспериментальные результаты исследования зависимости отклика составного черенковского ливневого спектрометра с конвертером из 1 мм ориентированного вдоль оси $\langle 111 \rangle$ кристалла вольфрама от энергии электронов 26 , 28 и 31 ГэВ. Положение максимума каскадной кривой и энерговыделение в максимуме каскадной кривой развития ливня в спектрометре при ориентированном конвертере имеют логарифмическую и пропорциональную зависимости от энергии электронов.

THE ENERGY DEPENDENCE OF THE RESPONSE OF THE ELECTROMAGNETIC SPECTROMETER WITH THE CONVERTER FROM THE ALIGNED CRYSTAL

B.A. Baskov

Abstract

Experimental results of research of dependence of the response compound cherenkov a shower spectrometer with the converter from 1 mm $\langle 111 \rangle$ crystals of tungsten aligned along an axis from energy electrons 26 , 28 and 31 GeV are presented. The position of a maximum of a cascade curve and the energy loses in a maximum of a cascade curve of development of a shower in a spectrometer at the aligned converter have logarithmic and proportional dependences from energy electrons.

baskov@x4u.lebedev.ru

Характеристики электромагнитных ливней (*стандартных* ливней), развивающихся в аморфных веществах, хорошо изучены [1,2]. На основе этих знаний производят моделирование и создают спектрометры и системы спектрометров, включающих тысячи и десятки тысяч единиц [3]. Электромагнитные ливни, развивающиеся в ориентированных кристаллах (*аномальные* ливни), начали изучать сравнительно недавно и до широкого практического использования пока дело не дошло. Однако проекты создания детекторов на основе развития *аномальных* ливней предлагались [1].

Аномальные электромагнитные ливни от электронов (позитронов) и γ -квантов с энергиями $E > 100 \text{ МэВ}$ развиваются в поле оси или плоскости ориентированного кристалла, начиная с углов входа $\Theta \sim V/mc^2$ (Θ – угол между импульсом частицы и осью (плоскостью) кристалла; V – масштаб потенциала оси или плоскости; m – масса электрона; c – скорость света) [1,2,4].

Аномальные ливни отличаются от *стандартных* ливней и особенно сильные отличия возникают при энергиях частиц десятки и сотни ГэВ и углах входа $\Theta \ll V/mc^2$. Отличия наблюдаются в числе заряженных и незаряженных частиц ливня, наличием несвойственных *стандартным* ливням ориентационной и температурной зависимостей, более сильной зависимости параметров ливня от толщины и типа кристалла, энергии частиц [4-6].

Отклик спектрометра, регистрирующего *аномальные* ливни, также отличается от отклика спектрометра, регистрирующего *стандартные* ливни [4-9]. Основное отличие заключается в изменении положений каскадной и интегральной кривых развития ливня в спектрометре за счет более интенсивного развития электромагнитных ливней в поле оси (плоскости) ориентированного конвертора. Поэтому остаётся актуальной задача исследования отклика электромагнитного спектрометра с ориентированным конвертером на основе кристалла в зависимости от изменения различных параметров кристалла, таких как толщина, ориентация, температура и энергия электронов (позитронов) и γ -квантов.

Данная работа посвящена анализу экспериментальных результатов исследования отклика электромагнитного спектрометра с кристаллическим конвертором и определению энергетических зависимостей отклика.

Исследование электромагнитных ливней осуществлялось с помощью составного черенковского ливневого спектрометра (*СЧЛС*), стоявшего за кристаллом. *СЧЛС* состоял из 10 независимых светоизолированных счетчиков (радиаторов) из свинцового стекла *ТФ-1*. Счетчики имели одинаковый размер 100×100 мм² и толщину $1X_0$. Такая градация спектрометра позволяла подробно исследовать каскадную кривую развитие электромагнитного ливня в спектрометре [10,11].

Ориентация кристаллов вольфрама ($X_0 = 3.5$ мм, X_0 - радиационная длина) осуществлялась вдоль оси $\langle 111 \rangle$, кристалл считался разориентированным (аморфным) при $\Theta = 20 \div 30$ мрад. Мозаичность кристаллов составляла $\Delta\Theta_w \approx 1$ мрад. В эксперименте использовался пучок электронов с энергией $E = 26, 28$ и 31 ГэВ с расходимостью $|\psi| \leq 0.1$ мрад по основанию [10]. Исследования проводились при комнатной температуре кристалла $T_1 = 293$ К и температуре жидкого азота $T_2 = 77$ К.

На рис. 1 приведены дифференциальные (каскадные) кривые развития электромагнитных ливней от электронов 26 ГэВ в *СЧЛС* в зависимости от толщины кристаллического вольфрамового конвертора (температура конвертора $T_1 = 293$ К; кристалл разориентирован - 1 и ориентирован - 2). На рисунке по оси абсцисс отложена толщина спектрометра *СЧЛС*, по оси ординат отложена средняя энергия ливня, оставленная им в каждом счетчике спектрометра. На рис. 1 приведена калибровочная кривая, когда перед *СЧЛС* отсутствует кристаллический конвертор ($t_w = 0$; зависимость 3) и начало развития ливня приходится на первый счетчик *СЧЛС*. Статистические ошибки не приведены, поскольку составляли менее 1% [7].

На рис. 2 приведены каскадные кривые развития ливня в *СЧЛС* при толщине конвертора 1 мм в зависимости от энергии электронов 26, 28 и 31 ГэВ. На

этом же рисунке представлены каскадные кривые для энергии электронов 28 ГэВ и двух температур конвертора T_1 и T_2 . Видно, что каскадные кривые изменяют своё положение при изменении энергии электронов и температуры кристалла [6,12].

На рис. 3 приведены каскадные кривые развития ливня в СЧЛС при толщине конвертора 1 мм при энергии электронов 28 ГэВ и температуре T_1 в зависимости от угла ориентации конвертора θ . Видно, что каскадные кривые изменяют своё положение при изменении угла ориентации [13].

Энергетические зависимости поведения положения максимума каскадной кривой (t_{\max}) для СЧЛС в зависимости от изменения различных параметров 1 мм вольфрамового конвертора представлены на рис. 4: без конвертора (1), с конвертером из разориентированного (2) и ориентированного вдоль оси $\langle 111 \rangle$ 1 мм конвертора (3). Зависимость 1 хорошо описывается выражением:

$$t_{\max} = \ln(E/E_c) - c, \quad (1)$$

где E - энергия электронов в МэВ, $E_c = 15$ МэВ – критическая энергия черенковского стекла ТФ-1 [14]; $c = 0.5$ [15,16].

Зависимость 2 смещена относительно зависимости 1 на величину толщины разориентированного кристалла (t_w) перед СЧЛС и описывается выражением:

$$t_{\max} = \ln(E/E_c) - c - t_w. \quad (2)$$

При ориентации кристалла уменьшается радиационная длина кристалла (X_0') и соответственно увеличивается его эффективная толщина $t_{w \text{ eff}} > t_w$ ($t_{w \text{ eff}}$ – эффективная толщина конвертора – это толщина, на которой происходит наиболее эффективное взаимодействие частиц с конвертером) [6,13,17-19]. Поведение t_{\max} от энергии электронов в этом случае описывается выражением (зависимость 3):

$$t_{\max} = \ln(E/E_c) - c - t_{w \text{ eff}}, \quad (3)$$

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

Если охладить кристалл вольфрама с комнатной температуры T_1 до температуры жидкого азота T_2 , то это приведет к сокращению амплитуды тепловых колебаний атомов кристалла в ~ 1.7 раза, что увеличит на $\sim 30\%$ глубину потенциальной ямы оси $\langle 111 \rangle$ и приведет к возрастанию сечений электродинамических процессов, которые в свою очередь приведут к увеличению интенсивности развития электромагнитных ливней и ещё большей сдвиге каскадной кривой к началу развития ливней или увеличению Δt [1,6,7,17,20]. Поведение t_{\max} от энергии электронов в этом случае (зависимость 4) описывается выражением:

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

где $\Delta t_{\text{temp}} = t(T_1)_{\max} - t(T_2)_{\max}$ является “добавкой” к толщине кристалла за счет изменения температуры уже ориентированного кристалла с T_1 до T_2 .

Из рис. 4 (зависимость 5) видно, что разность положений максимума ливня в СЧЛС $\Delta t = t_{\max p} - t_{\max o}$ при разориентированном и ориентированном кристалле от энергии электронов E при T_1 имеет пропорциональный характер. Можно предположить, что и при T_2 разность положений максимума ливня в СЧЛС (зависимость 6) имеет также пропорциональный характер. Аналогичная зависимость наблюдается и для γ -квантов [19].

На рис. 5 более подробно представлены энергетические зависимости поведения положения максимума каскадной кривой (t_{\max}) для СЧЛС от изменения угла ориентации l мм вольфрамового конвертора относительно оси $\langle 111 \rangle$ при температуре конвертора T_1 и энергии электронов [13].

Зависимость энерговыделения в максимуме каскадной кривой от энергии электронов при разориентированном кристалле и температуре кристалла T_1 представлено на рис. 6 (зависимость 1). Видно, что при разориентированном кристалле зависимость энерговыделения в максимуме пропорциональна энергии электронов [21], эта же зависимость сохраняется и при ориентации кристалла (зависимость 2). Одним измерением на рис. 6 представлено энерговыделение в максимуме каскадной кривой в случае охлаждения кристалла до T_2 (кристалл разориентирован - зависимость 3 и кристалл ориентирован – зависимость 4).

Можно предположить, что и в этом случае величина энерговыведения в максимуме пропорциональна энергии электронов.

Разность энерговыведений (зависимость 5) $\Delta E = \Delta E_{\max o} - \Delta E_{\max p}$ ($\Delta E_{\max o(p)}$ – энерговыведение при ориентированном (разориентированном) кристалле) при T_1 имеет пропорциональную зависимость. Можно предположить, что и в случае T_2 разность энерговыведений (зависимость 6) имеет такую же зависимость.

Надо отметить, что зависимости энерговыведения в максимуме каскадной кривой от энергии электронов для случаев отсутствия и наличия разориентированного кристалла перед СЧЛС совпадают, поскольку наличие разориентированного кристалла перед СЧЛС сдвигает каскадную кривую параллельно каскадной кривой относительно случая отсутствия кристалла (рис. 1) [7]. Такое поведение характерно для толщин кристаллов вольфрама $t_w \leq 2X_0$, поскольку для кристаллов с толщинами $t_w > 2X_0$ начинает сказываться поглощение энергии ливня кристаллом и вследствие этого уменьшение общего энерговыведения ливня в детекторе и, соответственно, в максимуме каскадной кривой [22]. В этом случае зависимость энерговыведения в максимуме каскадной кривой от энергии электронов при наличии разориентированного кристалла перед СЧЛС расходится с кривой при отсутствии кристалла перед СЧЛС.

Из представленных результатов можно сделать выводы: отклик электромагнитного спектрометра с конвертером из ориентированного кристалла, регистрирующего *аномальные* ливни, отличается от отклика спектрометра, регистрирующего *стандартные* ливни; положение максимума каскадной кривой развития ливня в спектрометре и энерговыведение в максимуме при разориентированном и ориентированном конвертере имеют логарифмическую и пропорциональную зависимости от энергии электронов, соответственно; разность положений максимума каскадной кривой развития ливня в спектрометре и разность энерговыведений в максимуме ливня в спектрометре при разориентированном и ориентированном кристалле пропорционально зависят от энергии электронов и фотонов.

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. Brown R.M., Cockerill D.J.A., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. (A), 2012, V. 666, P. 47.
4. Uggerhoj U.I., Reviews of Modern Physics, 2005, V. 77, P. 1131.
5. Басков В.А., Ганенко В.Б., Жебровский Ю.В. и др., Письма в ЖЭТФ, 1993, № 57, С. 282.
6. Басков В.А., Ким В.В., Лучков Б.И. и др., Краткие сообщения по физике, 2012, № 8, С.16.
7. Басков В.А., Краткие сообщения по физике, 2012, № 10, С.8.
8. Baskov V.A., Khablo V.A., Kim V.V. et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., 1998, V. B145, 92.
9. Басков В.А., Ганенко В.Б., Жебровский Ю.В. и др., Тезисы докладов XIX Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, МГУ, 1989, С. 84-86.
10. Басков В.А., Ким В.В., Сергиенко В.А., Хабло В.А., ПТЭ, 1990, № 5, 58.
11. Басков В.А., Белоусов А.С., Ким В.В. и др., ПТЭ, 2011, № 5, 66.
12. Басков В.А., Ким В.В., Лучков Б.И. и др., Препринт ФИАН, 2012, № 9, Москва.
13. Басков В.А., Ким В.В., Лучков Б.И. и др., Краткие сообщения по физике, 2013, № 5, С.8.
14. Говорков Б.Б., Труды Международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий, Дубна, 1970, 8-12 сентября С. 389.
15. Barnett V.M., Carone C.D., Groom D.E. at al., Particle Physics (Booklet), American Institute of Physics, Available from LBNL and CERN, July 1996, P. 172.
16. Словинский Б., Физика элементарных частиц и атомного ядра (ФЭЧАЯ), Дубна, 1994, т. 25, выпуск 2, С. 417.
17. Байер В.Н., Басков В.А., Ганенко В.Б. и др, ЖТЭФ, 1992, т. 101, 1351.
18. Басков В.А., Ким В.В., Лучков Б.И. и др., Препринт ФИАН, 2006, № 31, Москва.
19. Басков В.А., Ядерная физика и инжиниринг, 2013 (в печати).
20. Хабло В.А. Диссертация на звание к.ф.-м.н., 1999, С. 25.
21. Дунайцев А.Ф., Иваницин Ю.И., Какауридзе Д.Б. и др., Труды Международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий, Дубна, 1970, 8-12 сентября С. 414.
22. Басков В.А., Краткие сообщения по физике ФИАН, 2011, № 8, С. 11.

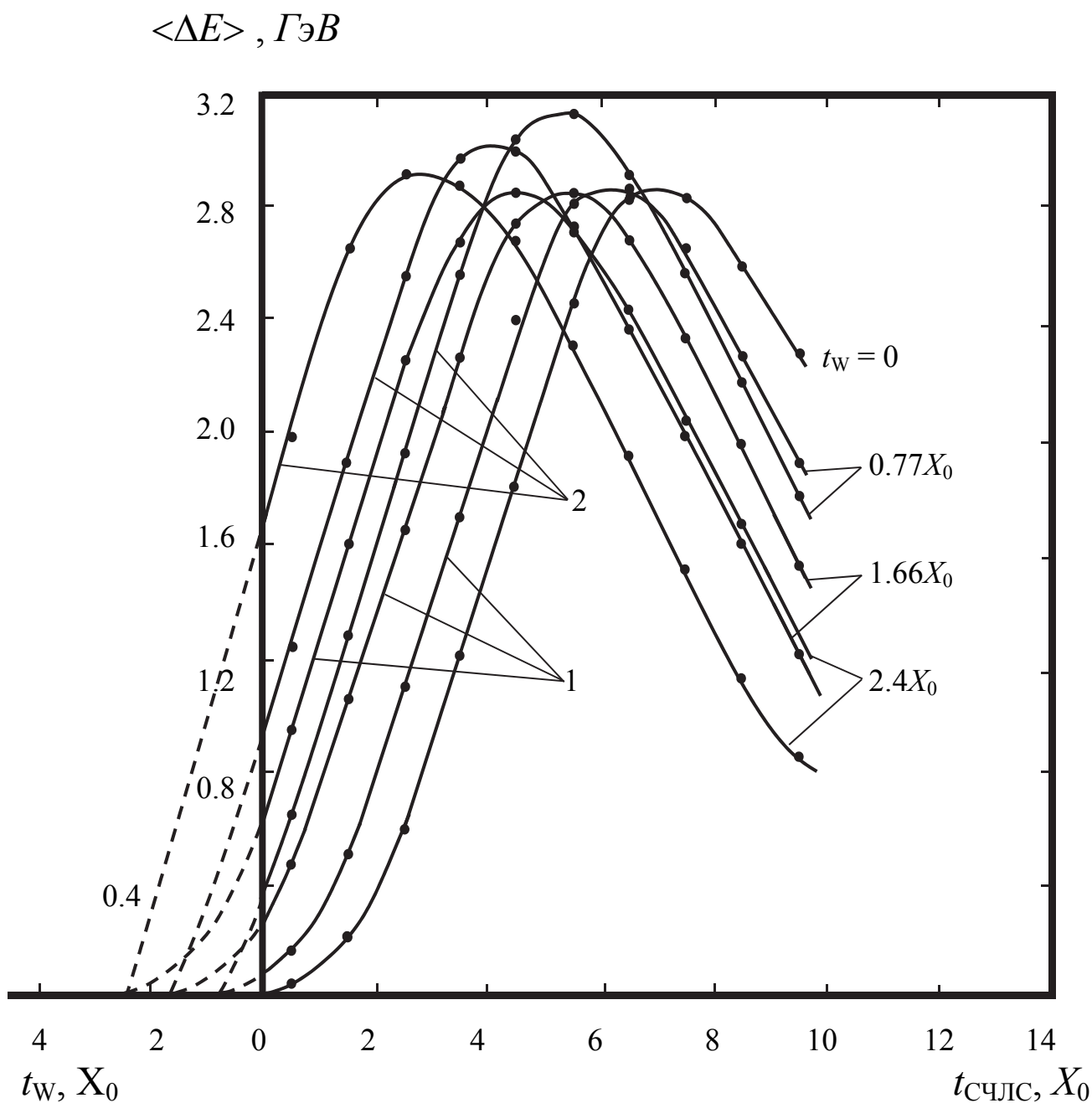


Рис. 1 Дифференциальные (каскадные) кривые развития электромагнитного ливня в СЧЛС от электронов с энергией $E = 26 \text{ ГэВ}$ при разных толщинах разориентированных (1) и ориентированных вдоль оси $\langle 111 \rangle$ (2) кристаллических вольфрамовых конвертерах ($\langle \Delta E \rangle$ – средняя энергия ливня, выделившаяся в каждом счетчике СЧЛС; t_w и $t_{\text{СЧЛС}}$ – толщины кристаллов и СЧЛС, соответственно; температура кристаллов $T_1 = 293\text{K}$; толщины кристаллов указаны справа от кривых).

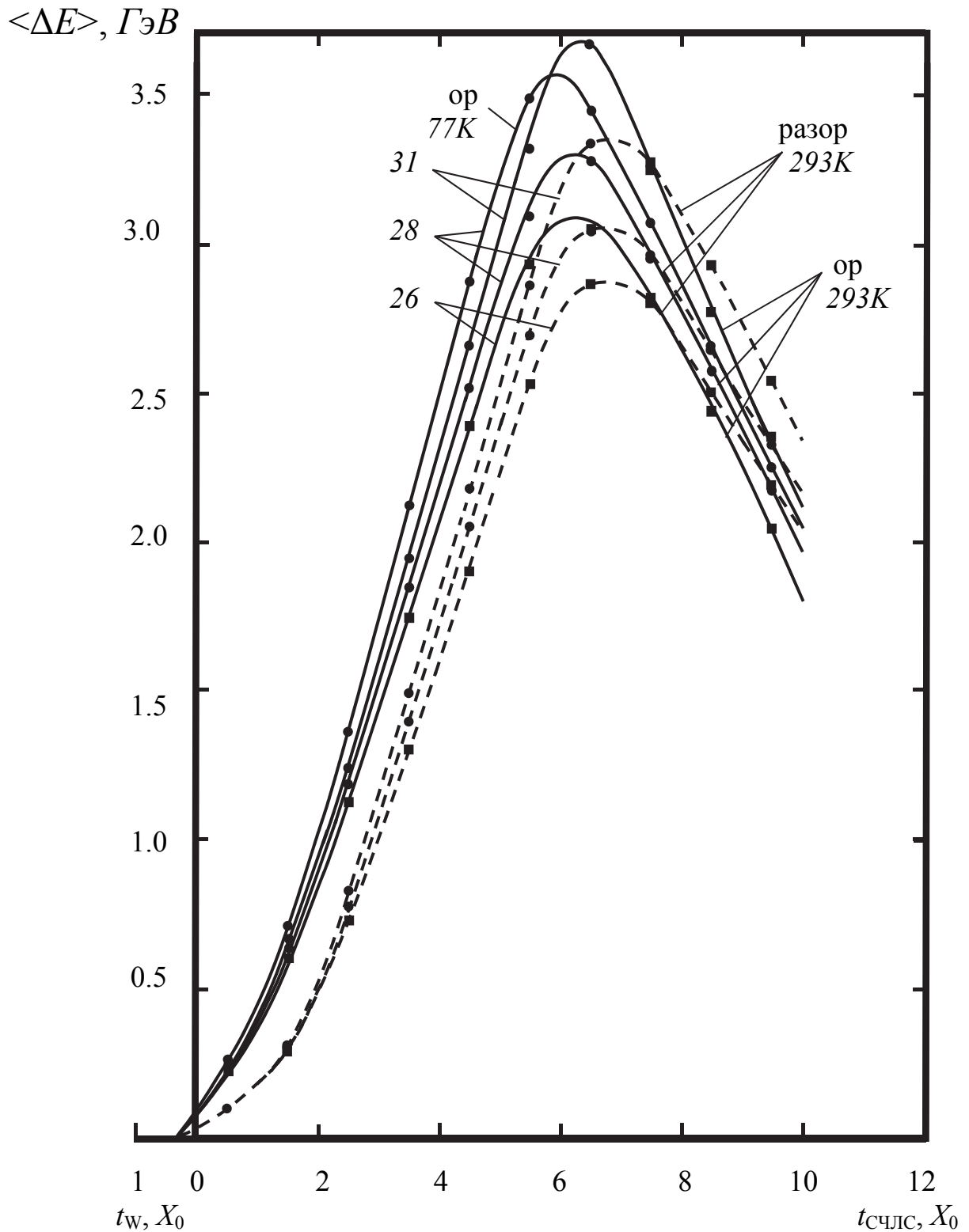


Рис. 2 Каскадные кривые развития электромагнитного ливня в СЧЛС от электронов с энергией 26, 28 и 31 ГэВ при разориентированном и ориентированном вдоль оси $\langle 111 \rangle$ кристаллическом вольфрамовом конверторе ($\langle \Delta E \rangle$ – средняя энергия ливня, выделившаяся в каждом счетчике СЧЛС; t_w и $t_{\text{СЧЛС}}$ – толщины кристаллов и СЧЛС, соответственно; ● – эксперимент; ■ - оценка; энергия электронов на рисунке показана слева от кривых).

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

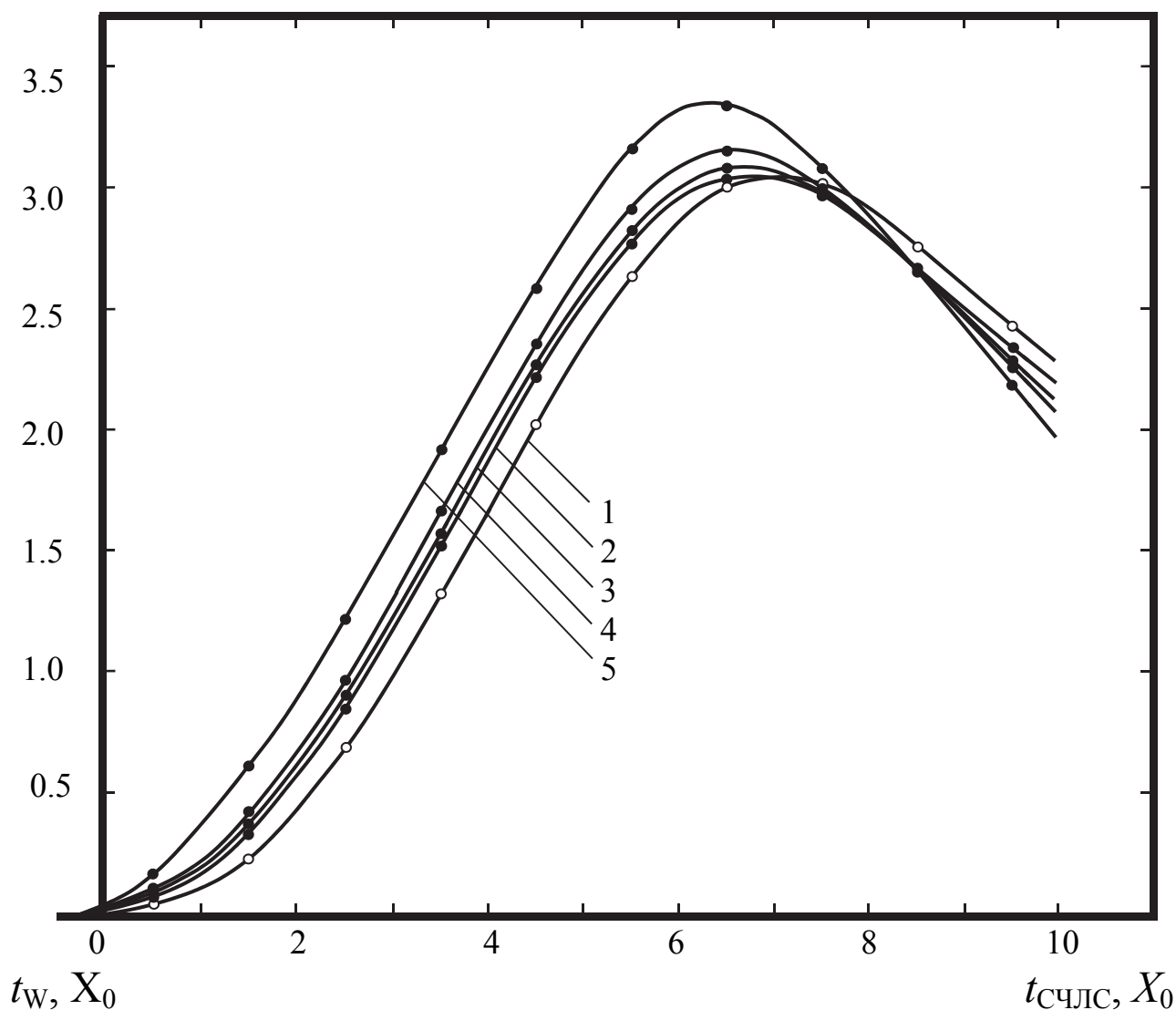


Рис. 3 Каскадные кривые развития электромагнитного ливня в СЧЛС от электронов с энергией $E = 28 \text{ ГэВ}$ в зависимости от угла ориентации Θ 1 мм кристаллического вольфрамового конвертора относительно оси $\langle 111 \rangle$ (температура конвертора: $T_1 = 293 \text{ К}$; $\langle \Delta E \rangle$ – средняя энергия ливня, выделившаяся в каждом счетчике СЧЛС; t_w и $t_{\text{СЧЛС}}$ – толщины конвертора и СЧЛС, соответственно; 1 – конвертер перед СЧЛС отсутствует; 2 – $\Theta = 45 \text{ мрад}$; 3 – $\Theta = 8 \text{ мрад}$; 4 – $\Theta = 4 \text{ мрад}$; 5 – $\Theta = 0 \text{ мрад}$).

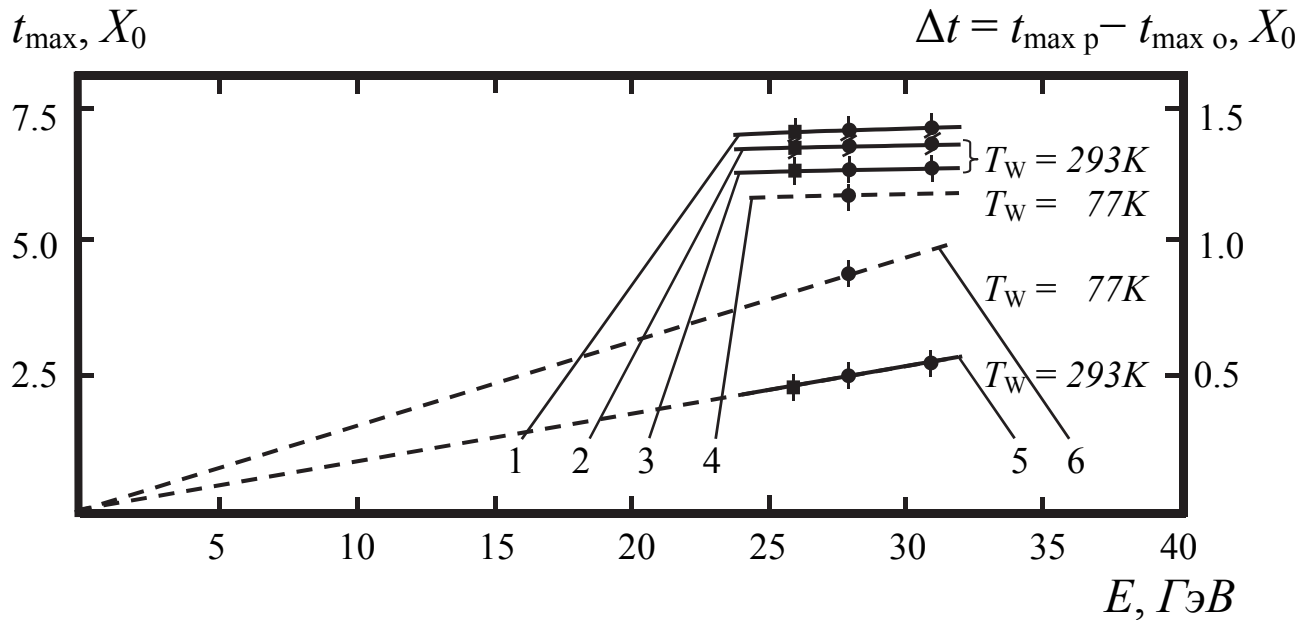


Рис. 4 Зависимость положения максимума каскадной кривой (t_{\max}) развития электромагнитного ливня в СЧЛС с 1 мм вольфрамовым кристаллическим конвертером и разность положений каскадной кривой при разориентированном и ориентированном конвертере ($\Delta t = t_{\max p} - t_{\max o}$) от энергии электронов E (1- конвертер перед СЧЛС отсутствует; 2 – конвертер разориентирован ($\Theta \geq 20 \text{ мрад}$); 3 – конвертер ориентирован вдоль оси $\langle 111 \rangle$ ($\Theta = 0$, $T_1 = 293K$); 4 – конвертер ориентирован вдоль оси $\langle 111 \rangle$ ($\Theta = 0$, $T_2 = 77K$); 5 - разность положения максимума каскадной кривой при разориентации конвертора относительно ориентации $\Delta t = t_{\max p} - t_{\max o}$ ($T_1 = 293K$); 6 - разность положения максимума каскадной кривой при разориентации конвертора относительно ориентации $\Delta t = t_{\max p} - t_{\max o}$ ($T_2 = 77K$); ● – эксперимент; ■ – оценка; ----- - экстраполяция).

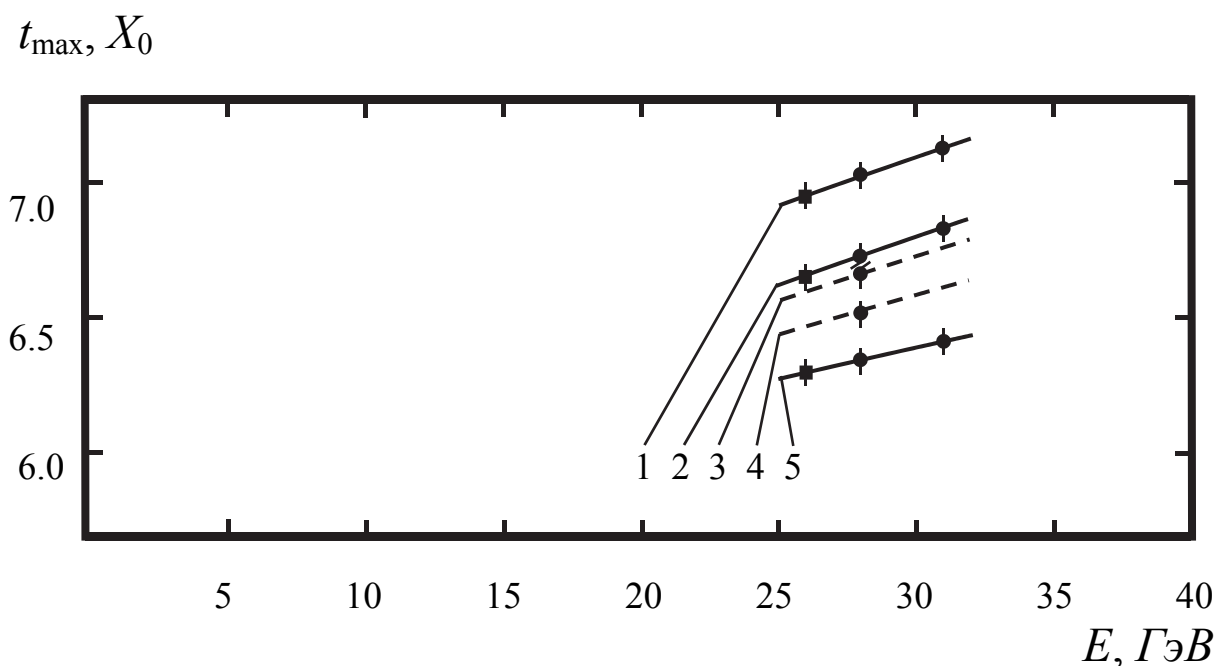


Рис. 5 Зависимость положения максимума каскадной кривой (t_{max}) развития электромагнитного ливня в СЧЛС с 1 мм вольфрамовом кристаллическим конвертером от энергии электронов E и угла ориентации конвертера Θ (1- конвертер перед СЧЛС отсутствует; 2 – конвертер разориентирован ($\Theta = 45$ мрад); 3 – конвертер ориентирован вдоль оси $\langle 111 \rangle$ ($\Theta = 8$ мрад); 4 – конвертер ориентирован вдоль оси $\langle 111 \rangle$ ($\Theta = 4$ мрад); 5 – конвертер ориентирован вдоль оси $\langle 111 \rangle$ ($\Theta = 0$ мрад); температура конвертера $T_1 = 293K$; ● – эксперимент; ■ - оценка; ----- - экстраполяция).

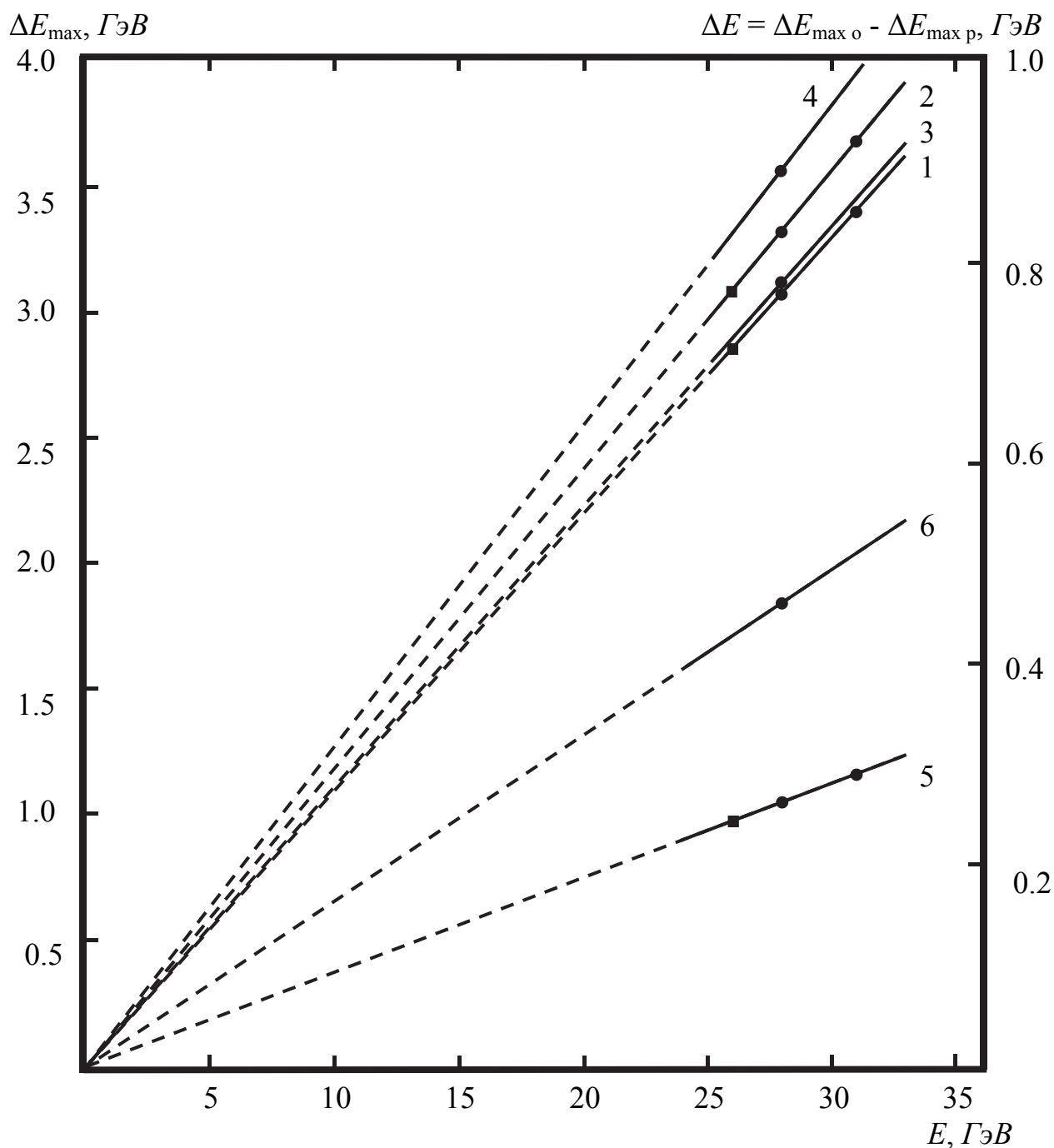


Рис. 6 Зависимость энергосвечения (ΔE_{\max}) в максимуме каскадной кривой развития электромагнитного ливня в СЧЛС с 1 мм вольфрамовым кристаллическим конвертором от энергии электронов E и температуры конвертора T (1 – конвертор разориентирован ($\Theta = 45$ мрад, $T_1 = 293$ К); 2 – конвертер ориентирован вдоль оси $\langle 111 \rangle$ ($\Theta = 0$ мрад, $T_1 = 293$ К); 3 – конвертер разориентирован ($\Theta = 45$ мрад, $T_2 = 77$ К); 4 – конвертер ориентирован вдоль оси $\langle 111 \rangle$ ($\Theta = 0$ мрад, $T_2 = 77$ К); $\Delta E = \Delta E_{\max o} - \Delta E_{\max p}$ – разность энергосвечений в максимуме развития ливня при ориентированном конвертере ($\Delta E_{\max o}$) относительно разориентированного ($\Delta E_{\max p}$) (5 – $T_1 = 293$ К; 6 – $T_2 = 77$ К); ● – эксперимент; ■ – оценка; ----- - экстраполяция).

Подписано в печать 04.07.2013 г.
Формат 60x84/16. Заказ №42. Тираж 140 экз. П.л 1.
Отпечатано в РИИС ФИАН с оригинал-макета заказчика
119991 Москва, Ленинский проспект, 53. Тел. 499 783 3640