

УДК 539.1.08

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ОТКЛИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СПЕКТРОМЕТРА С КОНВЕРТЕРОМ ИЗ ОРИЕНТИРОВАННОГО КРИСТАЛЛА

В. А. Басков

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. Обнаружено, что положение максимума каскадной кривой и энергосодержание в максимуме каскадной кривой развития ливня в спектрометре при ориентированном конвертере, как и в случае разориентированного, имеют логарифмическую и пропорциональную зависимости от энергии электронов.

Ключевые слова: ориентированный кристалл, электромагнитный спектрометр, отклик спектрометра, каскадная кривая, ориентационная зависимость, энергетическая зависимость, температурная зависимость.

Характеристики электромагнитных ливней (стандартных ливней), развивающихся в аморфных веществах, хорошо изучены [1, 2]. На основе этих знаний моделируются и создаются спектрометры и системы спектрометров, включающих тысячи и десятки тысяч единиц [3]. Электромагнитные ливни, развивающиеся в ориентированных кристаллах (*аномальные ливни*), начали изучать сравнительно недавно и широкое практическое использование ещё не началось. Однако проекты создания детекторов на основе развития *аномальных ливней* предлагались [1]. Поэтому задача исследования *аномальных ливней* и отклика спектрометра остаётся актуальной.

Отличие *аномальных ливней* от *стандартных* возникает при углах входа электронов (позитронов) и γ -квантов $\Theta \sim V/mc^2$ (Θ – угол между импульсом частицы и осью (плоскостью) кристалла; V – масштаб потенциала оси или плоскости; m – масса электрона; c – скорость света) и энергии $E > 100$ МэВ [1, 2, 4].

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

Особенно сильные отличия проявляются при энергиях частиц в десятки и сотни ГэВ и углах входа $\Theta \ll V/mc^2$. Отличия наблюдаются в числе заряженных и незаряженных частиц ливня, в наличии несвойственных *стандартным* ливням ориентационной и температурной зависимостей [4, 5].

Отклик спектрометра, регистрирующего *аномальные* ливни, также отличается от отклика спектрометра, регистрирующего *стандартные* ливни [4–6]. 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 конвертера. 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 энергии электронов (позитронов) и γ -квантов.

Данная работа посвящена анализу экспериментальных результатов исследования отклика электромагнитного спектрометра с кристаллическим конвертером 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 и толщиной $1X_0$. Такая градация спектрометра позволяла подробно исследовать каскадную кривую развития электромагнитного ливня в спектрометре [7, 8]. Ориентация кристаллов вольфрама ($X_0 = 3.5$ мм, X_0 – радиационная длина) осуществлялась вдоль оси $\langle 111 \rangle$, кристалл считался разориентированным (аморфным) при $\Theta = 20 - 30$ мрад. В эксперименте использовался пучок электронов с энергией $E = 26, 28$ и 31 ГэВ [7]. Исследования проводились при комнатной температуре кристалла $T_1 = 293$ К и температуре жидкого азота $T_2 = 77$ К.

Из анализа результатов исследований *аномальных* электромагнитных ливней, представленных в [6], видно, что при уменьшении угла между импульсом электрона и кристаллографической осью Θ , увеличении толщины t_w и уменьшении температуры T кристалла, а также при увеличении энергии электронов E параметры каскадной кривой меняются относительно параметров *стандартной* каскадной кривой. Увеличивается энерговыделение в первых счетчиках СЧЛС и уменьшается энерговыделение в счетчиках СЧЛС за максимумом каскадной кривой, происходит сдвигка каскадной кривой к началу развития ливня.

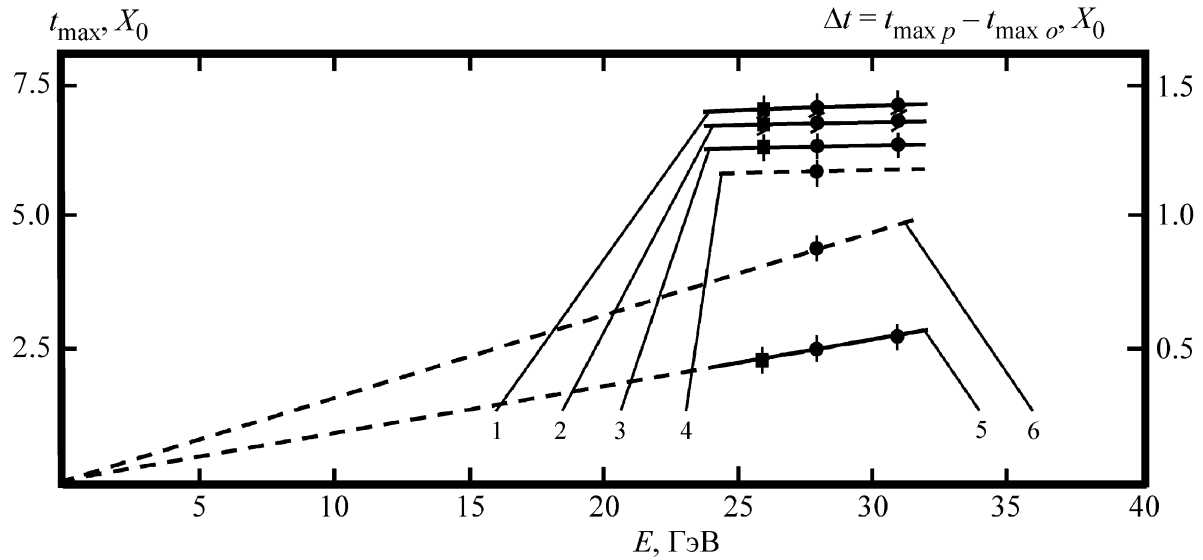


Рис. 1: Зависимость положения максимума каскадной кривой (t_{\max}) развития электромагнитного ливня в СЧЛС с 1 мм вольфрамовым кристаллическим конвертером от энергии электронов E (1 – конвертер перед СЧЛС отсутствует; 2 – конвертер разориентирован ($\Theta \geq 20$ мрад); 3 – конвертер ориентирован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

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

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

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

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

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

При ориентации кристалла уменьшается радиационная длина кристалла (X'_0) и со-

ответственно увеличивается его эффективная толщина $t_{w\text{eff}} > t_w$ ($t_{w\text{eff}}$ – эффективная толщина конвертера – это толщина, на которой происходит наиболее эффективное взаимодействие частиц с конвертером) [5, 6]. Поведение t_{max} от энергии электронов (3) в этом случае описывается выражением:

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

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

Если охладить кристалл вольфрама от 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, 5, 6]. Поведение t_{max} от энергии электронов в этом случае (зависимость 4) описывается выражением:

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

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

Из рис. 1 видно, что разность положений максимума ливня в СЧЛС $\Delta t = t_{\text{max}p} - t_{\text{max}o}$ в пределах исследованных толщин кристалла при разориентированном и ориентированном кристалле пропорциональна энергии электронов E при T_1 (5). Можно предположить, что и при T_2 разность положений максимума ливня в СЧЛС (6) также пропорциональна E .

На рис. 2 представлены энергетические зависимости поведения положения максимума каскадной кривой (t_{max}) для СЧЛС при разных углах ориентации 1 мм вольфрамового конвертера относительно оси $\langle 111 \rangle$ при температуре конвертера T_1 [9].

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

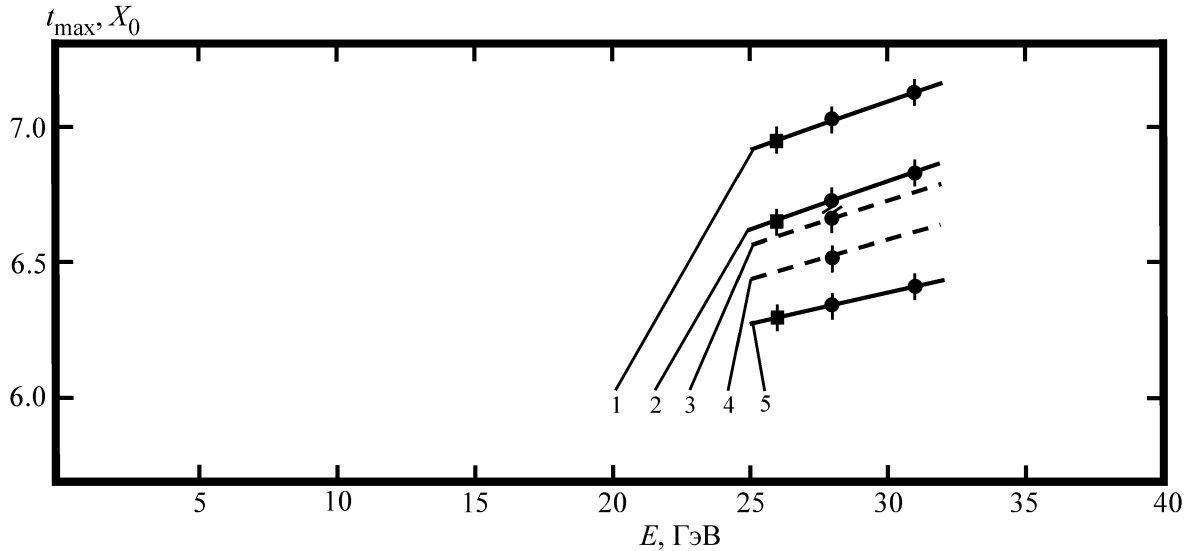


Рис. 2: Зависимость положения максимума каскадной кривой (t_{\max}) развития электромагнитного ливня в СЧЛС с 1 мм вольфрамовым кристаллическим конвертером от энергии электронов E и угла ориентации конвертера Θ (1 – конвертер перед СЧЛС отсутствует; 2 – конвертер разориентирован ($\Theta = 45$ мрад); 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 $T_1 = 293$ К; \bullet – эксперимент; \blacksquare – оценка; $---$ – экстраполяция).

разориентирован (3) и кристалл ориентирован (4)). Можно предположить, что и в этом случае величина энергосвечения в максимуме пропорциональна энергии электронов.

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

Надо отметить, что зависимости энергосвечения 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. 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 уменьшается общее энергосвечение ливня в детекторе и, соответственно, в максимуме каскадной кривой. В

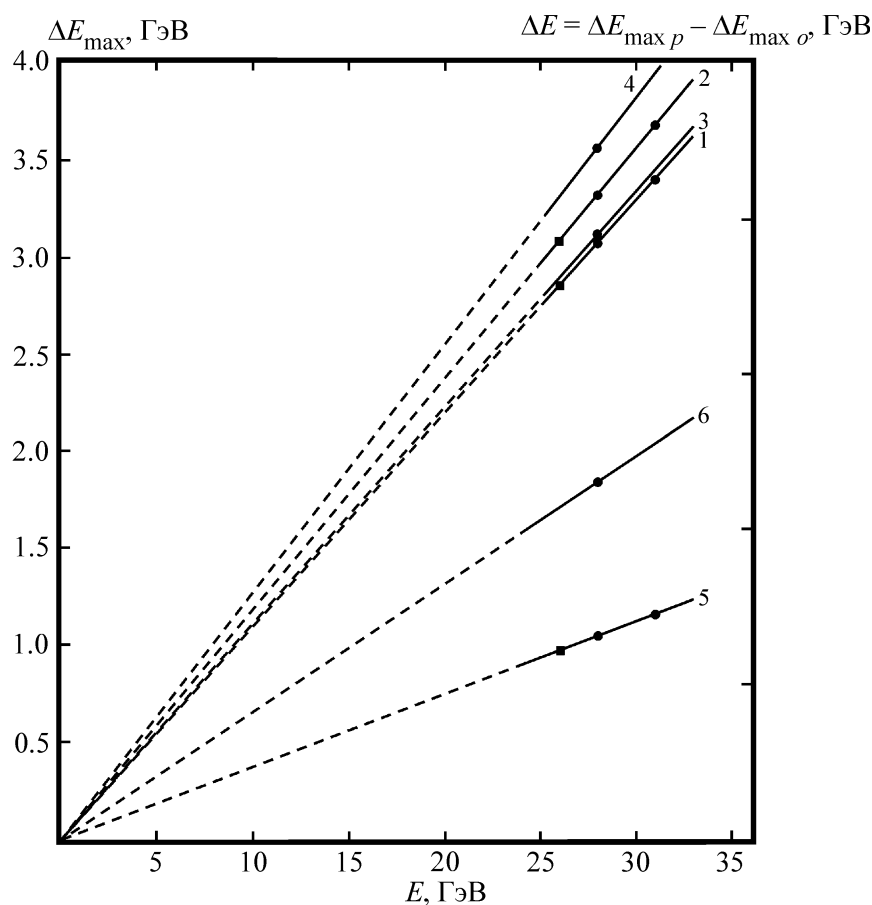


Рис. 3: Зависимость энерговыделения (ΔE_{\max}) в максимуме каскадной кривой развития электромагнитного ливня в СЧЛС с 1 мм вольфрамовым кристаллическим конвертером от энергии электронов E и температуры конвертера (1 – конвертер разориентирован ($\Theta = 45$ мрад, $T_1 = 293$ K); 2 – конвертер ориентирован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

этом случае зависимость энерговыделения в максимуме каскадной кривой от энергии электронов при наличии разориентированного кристалла перед СЧЛС отличается по форме от кривой при отсутствии кристалла перед СЧЛС [6].

Из представленных результатов можно сделать выводы: отклик электромагнитного спектрометра с конвертером из ориентированного кристалла, регистрирующего ано-

малые ливни, отличается от отклика спектрометра, регистрирующего *стандартные* ливни; положение максимума каскадной кривой развития ливня в спектрометре и энергосодержание в максимуме при как разориентированном, так и ориентированном конвертере имеют логарифмическую и пропорциональную зависимости от энергии электронов, соответственно; разность положений максимума каскадной кривой развития ливня в спектрометре и разность энергосодержаний в максимуме ливня в спектрометре при разориентированном и ориентированном кристалле пропорционально зависят от энергии электронов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. Н. Байер, В. М. Катков, В. М. Страховенко, *Электромагнитные процессы при высокой энергии в ориентированных монокристаллах* (Новосибирск, изд. “Наука” СО АН СССР, 1989).
- [2] А. И. Ахиезер, Н. Ф. Шульга, *Электродинамика высоких энергий в веществе* (Москва, Наука, 1993).
- [3] R. M. Brown, D. J. A. Cockerill, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A **666**, 47 (2012).
- [4] U. I. Uggerhoj, Reviews of Modern Physics **77**, 1131 (2005).
- [5] В. А. Басков, В. В. Ким, Б. И. Лучков и др., Краткие сообщения по физике ФИАН, **39**(8), 16 (2012).
- [6] В. А. Басков, Препринт ФИАН № 9 (Москва, ФИАН, 2013).
- [7] В. А. Басков, В. В. Ким, В. А. Сергиенко, В. А. Хабло, ПТЭ № 5, 58 (1990).
- [8] В. А. Басков, А. С. Белоусов, В. В. Ким и др., ПТЭ, № 5, 66 (2011).
- [9] В. А. Басков, В. В. Ким, Б. И. Лучков и др., Краткие сообщения по физике ФИАН, **40**(5), 8 (2013).

Поступила в редакцию 17 июля 2013 г.