

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ П.Н.ЛЕБЕДЕВА

ПРЕПРИНТ

В.А.БАСКОВ, В.В. КИМ, В.А. ХАБЛО

**РЕЖЕКЦИЯ ПО НАПРАВЛЕНИЮ
ЧАСТИЦ, ПРОШЕДШИХ
ОРИЕНТИРОВАННЫЙ КРИСТАЛЛ**

В ПЕЧАТЬ, В СВЕТ!

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

Гиппиус А.А.

МОСКВА 2010

РЕЖЕКЦИЯ ПО НАПРАВЛЕНИЮ ЧАСТИЦ, ПРОШЕДШИХ ОРИЕНТИРОВАННЫЙ КРИСТАЛЛ

В.А. Басков*, В.В. Ким, В.А. Хабло

А Н Н О Т А Ц И Я

Наличие ориентационной зависимости электромагнитных ливней, развивающихся в ориентированных кристаллах, является одним из эффектов, не наблюдающейся при развитии ливней в аморфном веществе. Ориентационная зависимость определяет зависимость параметров ливня от направления входа частиц в кристалл относительно оси или плоскости. Введение коэффициента режекции R позволяет определить вероятность попадания в выделенное направление входа частиц в кристалл, заданное точкой на ориентационной зависимости, частиц с других направлений.

REJECTION IN THE DIRECTION OF THE PARTICLES WHICH HAVE BEEN LAST THE ORIENTED CRYSTAL

V.A. Baskov*, V.V. Kim, V.A. Khablo

A B S T R A C T

Presence orientation dependences of the electromagnetic showers developing in orientation crystals, is one of effects which is not observed at development of showers in amorphous substance. Orientation dependence determines dependence of parameters of a shower on a direction of an entrance of particles in a crystal concerning an axis or planes. Introduction of factor rejection R allows to determine probability of hit in the allocated direction of an entrance of particles in a crystal, set by a point on orientation dependences, particles from other directions.

* - baskov@x4u.lebedev.ru

Электромагнитные ливни, инициированные электронами (позитронами) или фотонами высоких энергий ($E \geq 1$ ГэВ) в ориентированных кристаллах,

отличаются от стандартных ливней в аморфном веществе. Изменение угла между импульсом частицы и осью (плоскостью) кристалла приводит изменению параметров ливня и появлению ориентационной зависимости [1-4]. Кристалл считается ориентированным, если угол между импульсом частицы и ось (плоскостью) кристалла $\Theta = \Theta_0 = 0$ мрад и кристалл считается разориентированным, если угол $\Theta = \Theta_p \gg 0$ мрад.

Ориентация кристалла при изучении эффектов в кристалле осуществляется по величине средней амплитуды сигнала, снимаемого с детектора за кристаллом. Используются различные типы детекторов: полупроводниковые, сцинтилляционные, черенковские, свинцово-сцинтилляционные (сэндвичи) и их комбинации. Типичные ориентационные зависимости средней амплитуды сигнала, снимаемого с первого счетчика составного черенковского ливневого спектрометра СЧЛС, поперечным размером 100×100 мм² и толщиной каждого счетчика $1X_0$ (X_0 – радиационная длина) (10 счетчиков) и находящегося за кристаллом кремния толщиной 20 мм ($T = 293^\circ\text{K}$), показаны на рис. 1. Диапазон энергий γ - квантов, падающих на кристалл, $E_\gamma = 3 \div 15$ ГэВ [3].

На рис. 2 представлены амплитудные спектры с одинаковым числом событий в спектре первого счетчика СЧЛС для двух точек ориентационной зависимости, показанной на рис.1 [3]. Спектр 1 получен с разориентированным кристаллом, $\Theta \geq 200$ мрад, спектр 2 – с кристаллом ориентированным осью $\langle 110 \rangle$ на пучок γ - квантов с $E_\gamma = 3 \div 5$ ГэВ, $\Theta = 0$ мрад. Видно существенное различие спектров. Изменение формы спектра в случае ориентированного кристалла выразилось в “перекачке” амплитуд с меньшими номерами каналов в амплитуды с большими номерами каналов в правую часть спектра. Это приводит к изменению средней амплитуды спектра, связанной с его формой.

Наблюдаемое различие спектров 1 и 2 на рис. 2 позволяет ввести коэффициент режекции по направлению. С его помощью можно в общем

потоке γ -квантов с определённой вероятностью измерить долю γ -квантов, падающих на кристалл вдоль кристаллографической оси, к доли γ -квантов, падающих на кристалл под конкретным углом Θ к оси. То есть, с помощью коэффициента режекции можно выделять γ -кванты (электроны или позитроны) падающие на кристалл в определённом направлении относительно заданного направления [6].

Режекция по направлению (R) определяется как отношение эффективности регистрации γ -квантов (электронов или позитронов) детектором за кристаллом, прошедших разориентированный кристалл $\Theta_p \gg 0$ (ϵ^p), к эффективности регистрации γ -квантов (электронов, позитронов), прошедших ориентированный кристалл $\Theta_o = 0$ или под углом $\Theta_p \geq \Theta \geq \Theta_o$ (ϵ^o):

$$R = \epsilon^p / \epsilon^o. \quad (3)$$

Эффективности регистрации можно определить несколькими способами. В работах [5] и [6] представлен один из вариантов определения эффективностей и на их основе коэффициент режекции. Эффективности регистрации при разориентированном и ориентированном кристалле определены соответственно как:

$$\epsilon^x = \sum_{i=m}^{k_{\max}^x} N_i^x / \sum_{i=1}^{k_{\max}^x} N_i^x \quad (1)$$

где $x = o, p$ (o – ориентированный кристалл; p – разориентированный кристалл); N_i^x - число событий в i канале амплитудных спектров; $\sum_{i=1}^{k_{\max}^x} N_i^x$ - полное число событий в амплитудных спектрах при соответственно разориентированном и ориентированном кристалле; k_{\max}^x – номер максимального канала в спектре с ненулевым числом событий; m канал, относительно которого происходит режекция.

Канал режекции определялся как $m = \langle i \rangle + n \cdot \sigma_{\langle i \rangle}$, где $\langle i \rangle$ - среднее значение канала по спектру разориентированного кристалла

$$\langle i \rangle_p = \sum_{i=1}^{k_{m \text{ ax}}^p} i \cdot N_i^p / \sum_{i=1}^{k_{m \text{ ax}}^p} N_i^p ; \quad \sigma_{\langle i \rangle} - \text{среднеквадратичная ошибка величины}$$

среднего канала по спектру разориентированного кристалла; n – число стандартных отклонений $\sigma_{\langle i \rangle}$.

Было показано, что при $n = 6$ величина режекции для спектров на рис. 2 составила $R = R(6\sigma_{\langle i \rangle}) = 0,005 \pm 0,002$. Это означает, что для углов $\Theta_p \geq 200$ мрад по отношению к углу $\Theta_0 = 0$ мрад (ось ориентации $\langle 110 \rangle$) с вероятностью $0,5 \pm 0,2\%$ можно зарегистрировать γ -кванты, прошедшие кристалл под углом $\Theta \geq 200$ мрад к оси.

Дальнейшие исследования показали, что критерий, по которому происходит выбор канала режекции в [5] и [6], оказывается не оптимальным, поскольку величина среднего канала по спектру, а следовательно и канал режекции зависят от энергии.

Если в качестве канала режекции брать канал m , в котором число событий в спектрах разориентированного и ориентированного кристалла было бы одинаковым $N_m^p = N_m^0 = N$, то такое определение канала режекции будет оптимальным. Канал m при таком определении является также каналом трансформации спектра в методе сравнения амплитудных спектров, названным также «Метод коэффициента трансформации спектра β ». В работе [7] дано определение этого метода, представлены его зависимости от энергии частиц, толщин кристаллов и описаны свойства канала m .

Обнаружено, что для системы кристалл-детектор в пределах энергий γ -квантов и электронов в десятки ГэВ зависимости m от энергии не существует. Величина m не зависит от типа частицы – электрон (позитрон) или γ -квант.

Например, для кристалла вольфрама толщиной 1 мм ($T_w=77^\circ\text{K}$), осью ориентации $\langle 111 \rangle$, указанного диапазона энергий частиц и детектора, являющимся первым счетчиком СЧЛС, величина канала m в энергетических единицах составила 180 МэВ. Если для регистрации частиц использовать первый счетчик составного свинцово-сцинтилляционного спектрометра (ССЛС), то величина канала m составляет 110 МэВ. ССЛС - составной свинцово-сцинтилляционный спектрометр, состоящий из 10 независимых счетчиков толщиной $1,2X_0$. Каждый счетчик ССЛС имел размер 100×100 мм² и состоял из 4-х свинцовых пластин толщиной 2 мм, прослоенными 4-мя сцинтилляционными пластинами толщиной 5 мм [2].

При изменении условий измерения, например, при изменении типа кристалла, его толщины или температуры, типа детектора и т. д. меняется величина канала m , оставаясь постоянной при изменении энергии частиц.

При таком определении канала режекции m величину R можно определить несколькими способами, например:

1. $R_1 = \varepsilon_r^p / \varepsilon_r^o$
2. $R_2 = \varepsilon_r^p / (\varepsilon_l^o + \varepsilon_r^o)$
3. $R_3 = \varepsilon_r^p + \varepsilon_l^o$
4. $R_4 = [(\varepsilon_r^o + \varepsilon_l^p) / (\varepsilon_r^p + \varepsilon_l^o)] - 1$, где

$$\varepsilon_l^x = \sum_{i=1}^m N_i^x / \sum_{i=1}^{k_{\max}^x} N_i^x \quad (2)$$

$$\varepsilon_r^x = \sum_{i=m+1}^{k_{\max}^x} N_i^x / \sum_{i=1}^{k_{\max}^x} N_i^x$$

В формулах (2) $x = o, p$ (o – ориентированный кристалл; p – разориентированный кристалл); r – “правая” часть спектра; l – “левая” часть

спектра; N_i^x - число событий в i канале амплитудных спектров; $\sum_{i=1}^{k_{\max}^x} N_i^x$ - полное число событий в амплитудных спектрах при соответственно разориентированном и ориентированном кристалле; k_{\max}^x - номер максимального канала в спектре с ненулевым числом событий; m канал, относительно которого происходит режекция.

Для указанных способов определения режекции на рис. 4 представлено поведение R от энергии γ -квантов, падающих на кристалл вольфрама толщиной 1 мм ($T = 77^\circ\text{K}$). Режекция определялась для угла $\Theta_0 = 0$ мрад (ось ориентации $\langle 111 \rangle$) по отношению к углу $\Theta_p = 23$ мрад с помощью первого счетчика СЧЛС при $m = 180$ МэВ.

Увеличение энергии частиц приводит к большему расхождению амплитудных спектров при ориентированном и разориентированном кристалле, лучшему их разделению и, соответственно, к улучшению режекции.

Зависимость $R = R_1$ от толщины кристалла t_w для электронов с энергией $E_e = 26$ ГэВ ($T_w = 293^\circ\text{K}$; $\langle 111 \rangle$) представлена на рис. 5. Сигналы снимались с первого счетчика СЧЛС, стоящего за кристаллом. Видно, что с увеличением толщины кристалла t_w режекция R уменьшается, то есть режекция или степень разделения спектров улучшается.

Режекция R определяется на основе тех же спектров, что и β и поэтому её величина зависит от типа применяемого детектора [7]. Например, величина R для $\Theta_0 = 0$ по отношению к углу $\Theta_p = 23$ мрад для спектров, снимаемых с СЧЛС и ССЛС, перед которыми находился кристалл вольфрама 1мм ($T = 77^\circ\text{K}$; $\langle 111 \rangle$) составила $R_{\text{СЧЛС}} = 0,333 \pm 0,016$ и $R_{\text{ССЛС}} = 0,363 \pm 0,028$.

Интенсивное развитие ливня в ориентированном кристалле приводит к изменению формы отклика детектора по отношению к обычному ливню, появляется ориентационная зависимость параметров ливня. Введение коэффициента режекции R на основе измененной формы отклика детектора

даёт возможность выделить заданное направление движения частиц и определить вероятность попадания в это направление частиц с других направлений.

Р можно также использовать для определения степени отличия обычных ливней при изменении, например, энергии частиц или толщины аморфного конвертора перед детектором.

Авторы выражают благодарность Е.И. Тамму ror: Reference source not found и Е.И. Малиновскому за поддержку работы, В.И. Сергиенко за практическое руководство и организацию работ, Б.И Лучкову (МИФИ) и В.Ю. Тугаенко (МИФИ) за помощь в работе, Б.Б. Говоркову за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Baier V.N., Katkov V.M., Strakhovenko V.M.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1996. V. **B119**. P. 131.
2. *Baskov V.A., Khablo V.A., Kim V.V. et al.* // Radiation Effects and Defects in Solids. 1993. V. **25**. P. 23.
3. *Басков В.А., Ганенко В.Б., Гущин В.А. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 1989. **№50**. С. 395.
4. *Басков В.А., Ким В.В., Лучков Б.И. и др.* // Препринт ФИАН. **№31**. Москва. 2006.
5. *Басков В.А., Ким В.В., Лучков Б.И. и др.* // Препринт ФИАН. **№14**. Москва. 2005.
6. *Басков В.А., Говорков Б.Б., Ким В.В.* // Письма в ЖЭТФ. 1992. **№56**. С. 233.
7. *Басков В.А., Ким В.В., Хабло В.А.* // Препринт ФИАН. **№2**. Москва. 2010.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ:

Рис. 1 Ориентационные зависимости: $\langle A \rangle$ - средней амплитуды сигналов с первого счетчика СЧЛС (левая ордината - \bullet , \circ , \blacksquare , \blacktriangledown); β - трансформации амплитудного спектра сигнала с первого счетчика СЧЛС (правая ордината - Δ).
 \bullet - $E_\gamma = 3 \div 5$ ГэВ, \circ - $E_\gamma = 5 \div 7$ ГэВ, \blacksquare - $E_\gamma = 7 \div 10$ ГэВ, \blacktriangledown - $E_\gamma = 10 \div 15$ ГэВ, Δ - $E_\gamma = 3 \div 5$ ГэВ.

Рис. 2 Амплитудные спектры сигналов с первого счетчика СЧЛС, стоящего за кристаллом кремния ($t_{Si} = 20$ мм; $T = 293^\circ\text{K}$; $E_\gamma = 3 \div 5$ ГэВ): 1 - кристалл разориентирован ($\Theta \geq 200$ мрад); 2 - кристалл ориентирован вдоль оси $\langle 110 \rangle$ ($\Theta = 0$ мрад).

Рис. 3 Зависимость канала трансформации спектра m от толщины кристалла вольфрама с осью ориентации $\langle 111 \rangle$ и типа детектора: \bullet - $E_e = 26$ ГэВ (СЧЛС, $T_w = 293^\circ\text{K}$); \blacksquare (СЧЛС), \blacktriangle (ССЛС) - $E_e = 28$ ГэВ ($T_w = 77^\circ\text{K}$); \circ - вольфрам перед СЧЛС и ССЛС отсутствует.

Рис. 4 Зависимость коэффициента режекции R от энергии γ -квантов ($t_w = 1$ мм; $T = 77^\circ\text{K}$; ось ориентация $\langle 111 \rangle$): \bullet - R_1 ; \blacksquare - R_2 ; \circ - R_3 ; \blacktriangle - R_4 . Режекция определена для $\Theta_0 = 0$ по отношению к $\Theta_p = 23$ мрад при $m = 180$ МэВ.

Рис. 5 Зависимость коэффициента режекции R от толщины кристалла вольфрама ($T = 293^\circ\text{K}$; ось ориентация $\langle 111 \rangle$). Режекция определена для $\Theta_0 = 0$ по отношению к $\Theta_p = 23$ мрад.

$\langle A \rangle$, каналы

β

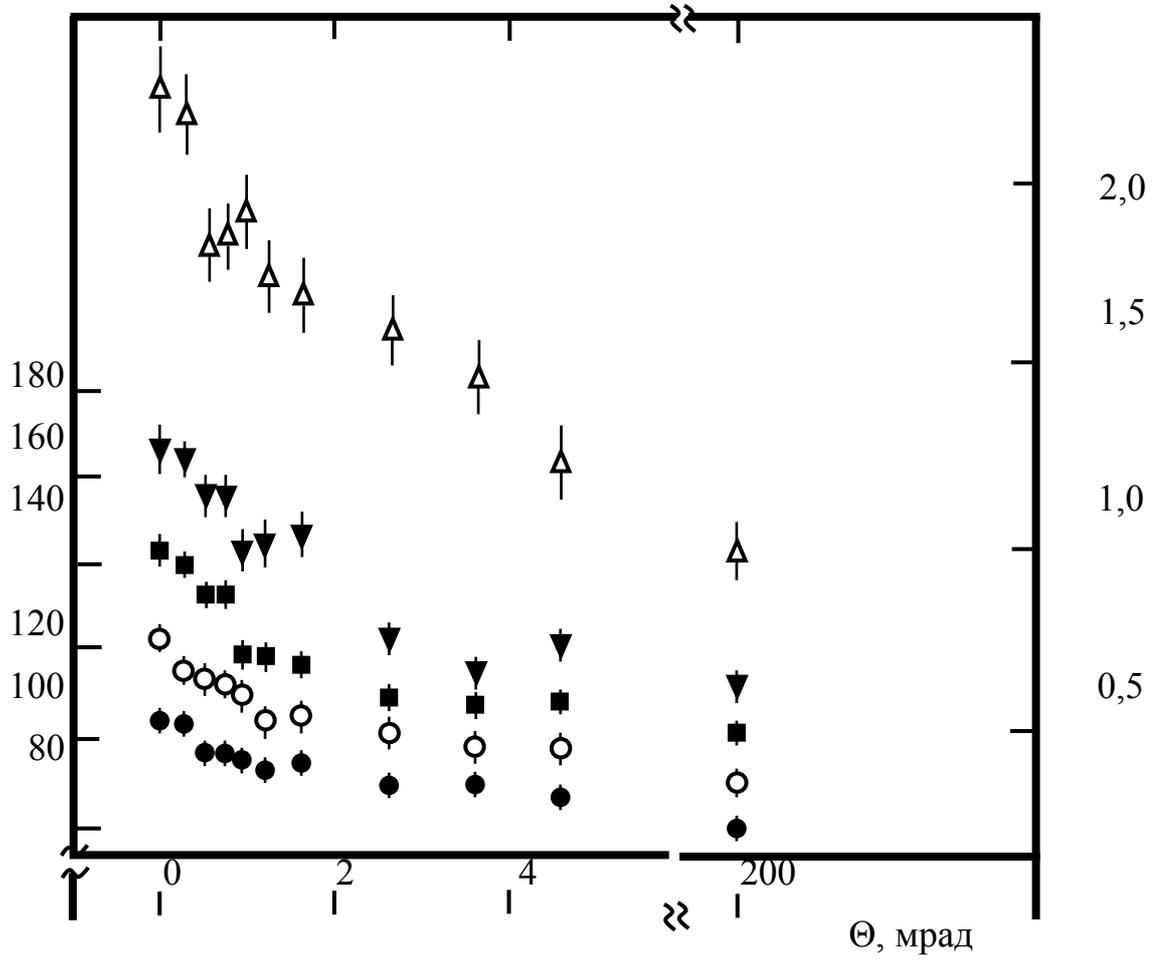


Рис. 1

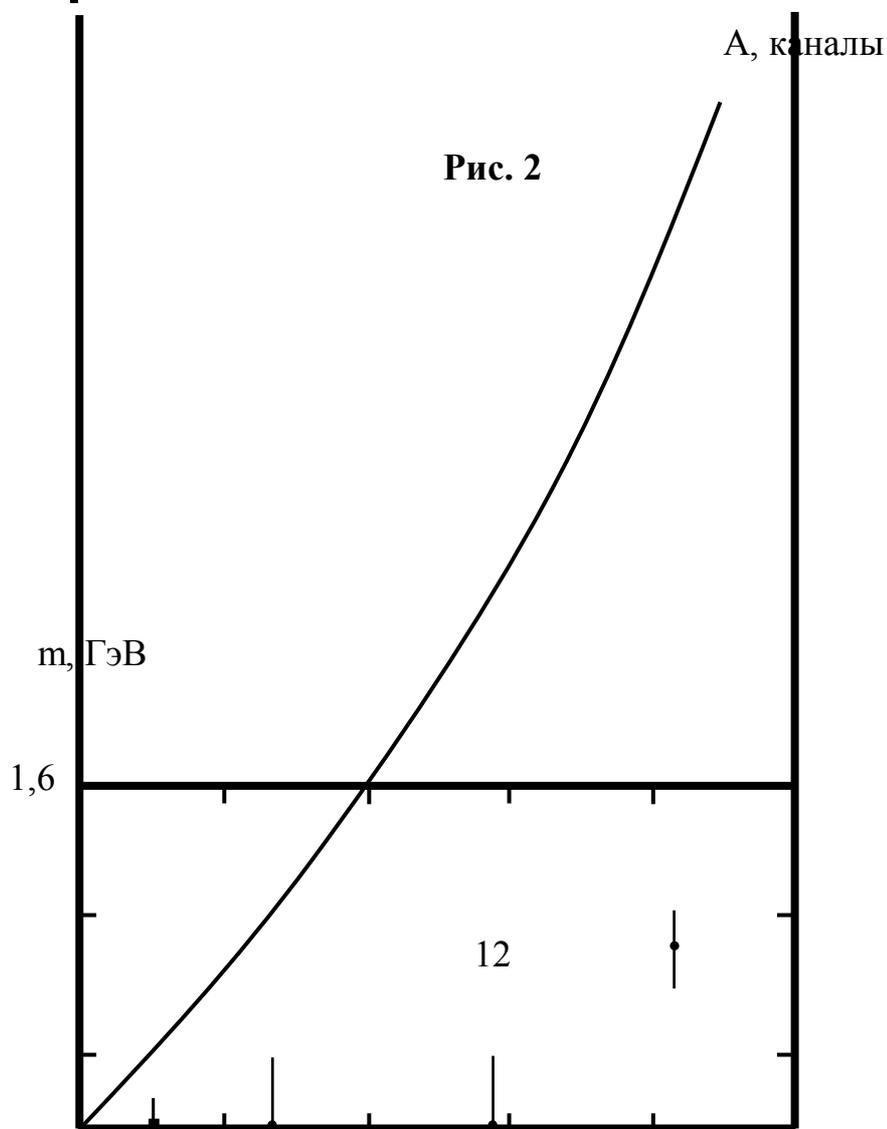
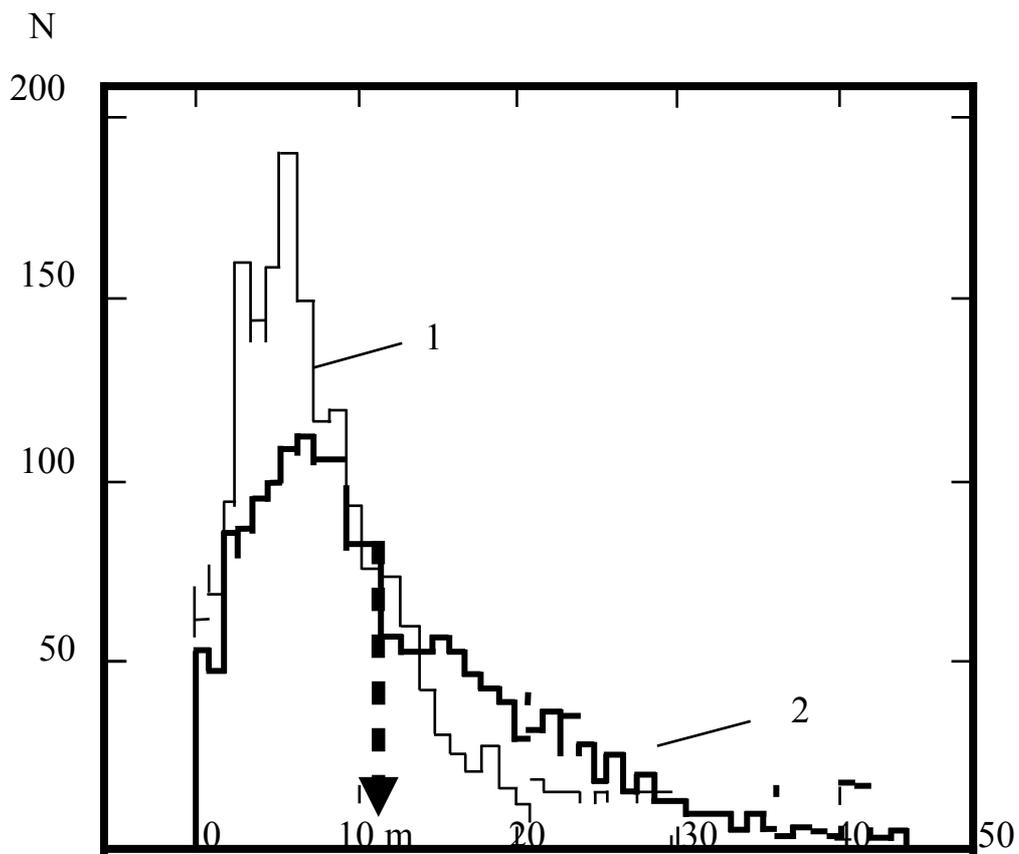


Рис. 2

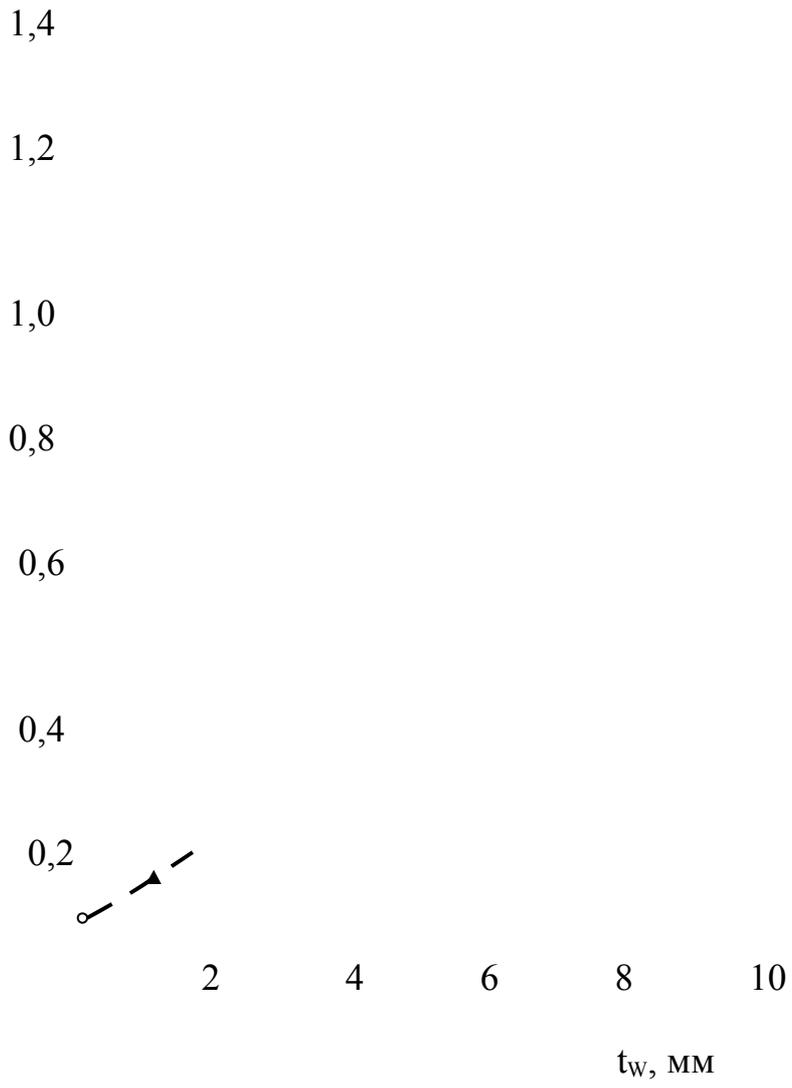
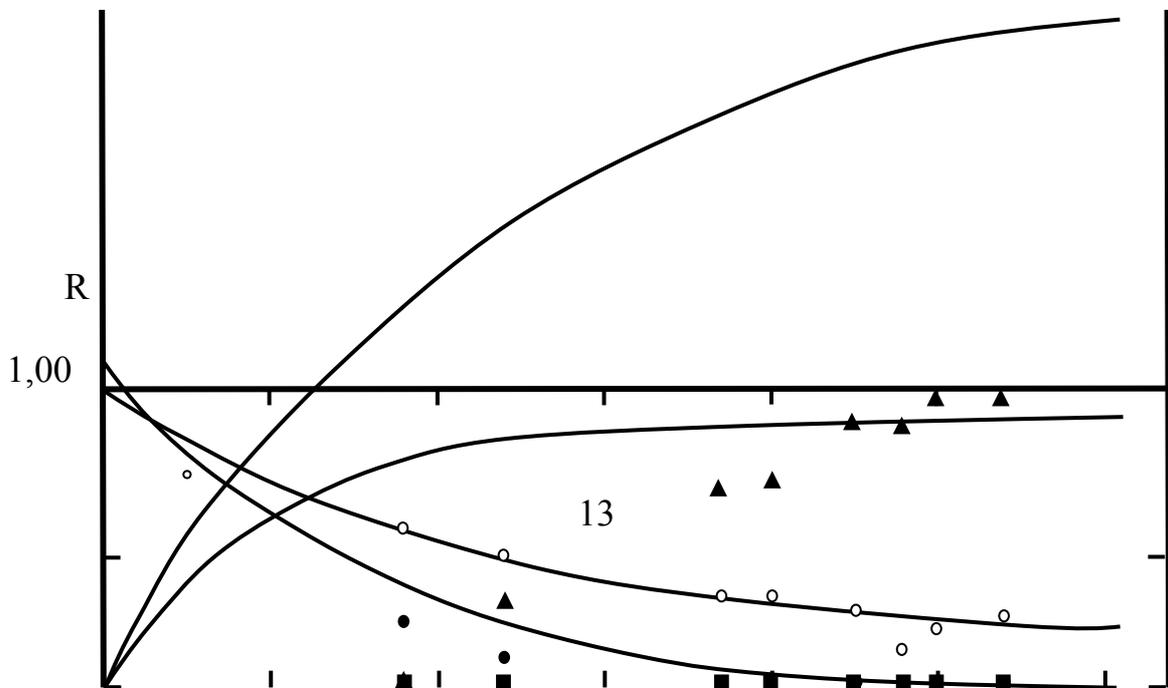


Рис. 3



0,75

0,50

0,25

5

10

15

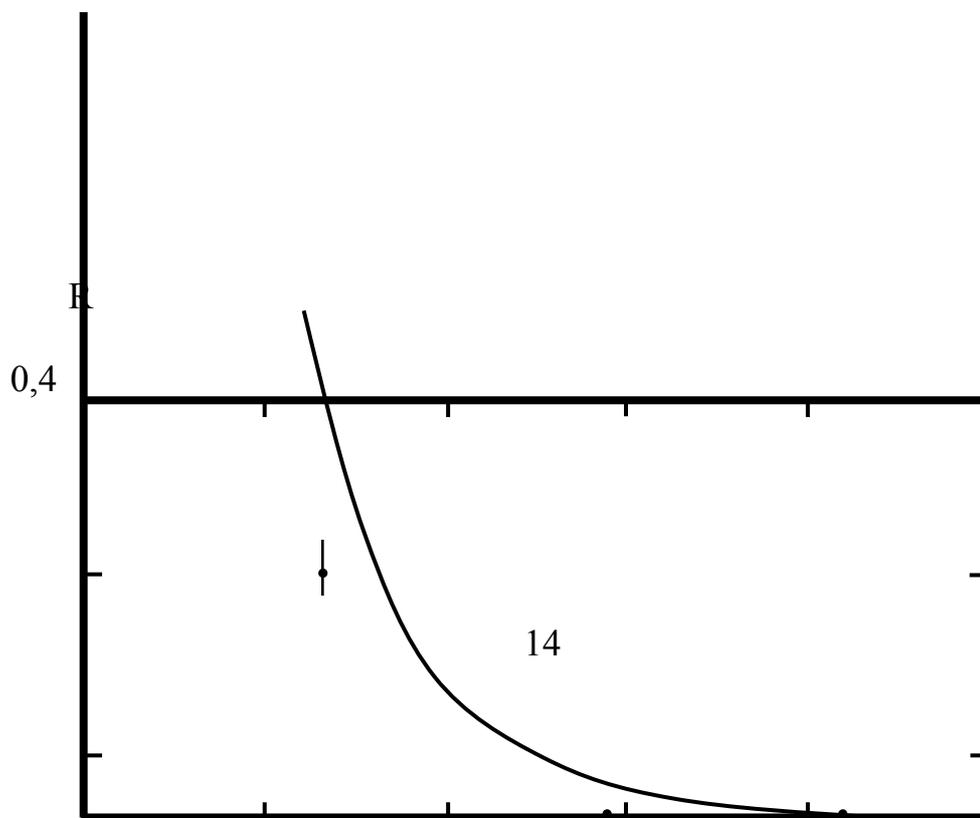
20

25

30

$\langle E_\gamma \rangle$, ГэВ

Рис. 4



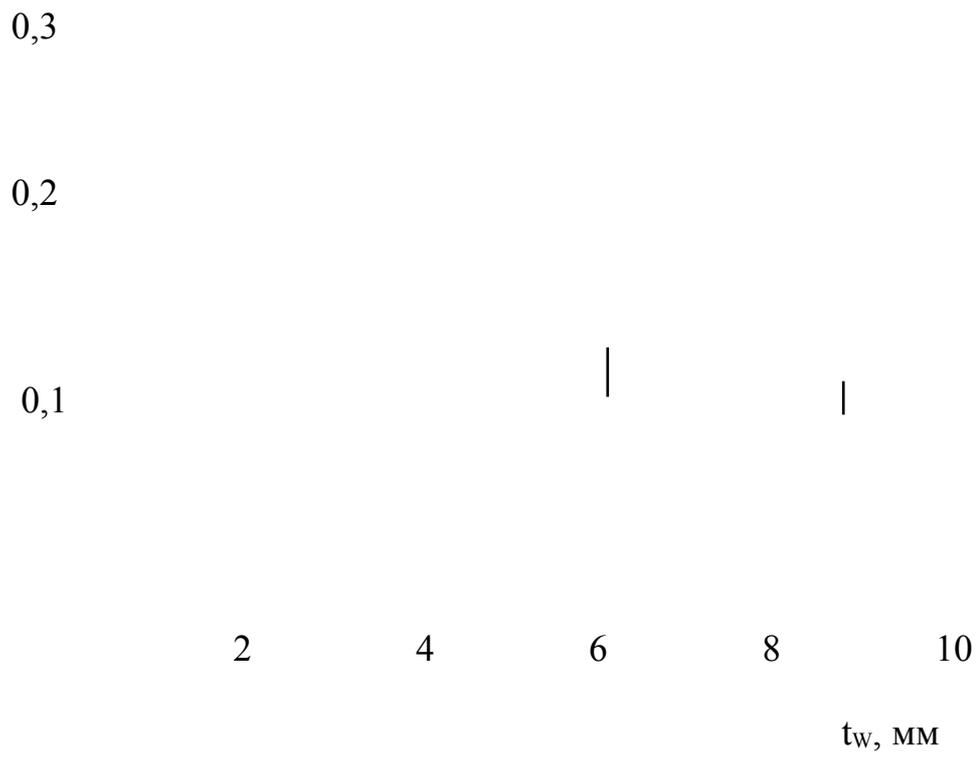


Рис. 5