

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

ПРЕПРИНТ

В.А.БАСКОВ, В.В. КИМ, В.А. ХАБЛО

**ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТОДА  
ТРАНСФОРМАЦИИ  
АМПЛИТУДНОГО СПЕКТРА**

**В ПЕЧАТЬ, В СВЕТ!**

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

**Гиппиус А.А.**

**МОСКВА 2010**

**ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТОДА ТРАНСФОРМАЦИЯ  
АМПЛИТУДНОГО СПЕКТРА**

**В.А. Басков\*, В.В. Ким, В.А. Хабло**

**Аннотация**

Аномальные электромагнитные ливни в ориентированных кристаллах отличаются от обычных ливней в аморфном веществе. Введение коэффициента трансформации амплитудного спектра позволяет точно определять степень отличия аномальных ливней от обычных при изменении энергии частиц, угла ориентации кристалла и т.д. В работе представлены новые результаты исследований характеристик метода трансформации амплитудного спектра.

**CHARACTERISTICS OF THE METHOD  
TRANSFORMATION OF THE AMPLITUDE SPECTRUM**

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

## Abstract

Anomalous electromagnetic showers in the oriented crystals differ from usual showers in amorphous substance. Introduction of factor of transformation of a amplitude spectrum allows to determine precisely a degree of difference of anomalous showers from usual at change of a particle energy, a corner of orientation of a crystal, etc. In work new results of researches of characteristics of a method of transformation of a amplitude spectrum are presented.

\* *baskov@x4u.lebedev.ru*

При прохождении фотонов, электронов или позитронов с энергиями в десятки и сотни ГэВ через ориентированный кристалл, происходит резкое возрастание сечений электродинамических процессов излучения электронами (позитронами) и рождения электрон-позитронных пар фотонами, что приводит к развитию нестандартных (аномальных) электромагнитных ливней [1,2,3]. В аномальных ливнях возрастает число заряженных частиц  $N_e$  и число фотонов  $N_\gamma$ , изменяются их энергетические спектры, что сказывается на изменении отклика детектора, регистрирующего ливни [4,5,7,11].

В работе представлены новые результаты обработки данных экспериментальных исследований, проведенных на электронном канале ускорителя ИФВЭ на установке “Каскад” [8]. Показаны характеристики введенного в работах [2,6] метода сравнения амплитудных спектров с детектора, находящегося за кристаллом, который позволяет точнее по сравнению с другими методами определить степень изменения отклика детектора при ориентации кристалла вдоль оси (плоскости) или по степени изменения отклика детектора определить степень ориентации кристалла.

Интенсивное развитие электромагнитных ливней в ориентированных кристаллах приводит к сдвигу каскадной кривой в сторону начала развития ливня [1,2,3,7]. Кристалл считается ориентированным, если угол между

импульсом частицы и осью (плоскостью) кристалла  $\Theta = \Theta_0 = 0$  и разориентированным при  $\Theta = \Theta_p \gg 0$ . Сравнение амплитудных спектров с детектора за кристаллом на всем протяжении каскадной кривой показывает существенное изменение спектров при ориентации кристалла относительно спектров при разориентированном кристалле, то есть при аморфном состоянии.

На рис. 1а представлены амплитудные спектры с одинаковым числом событий в спектре с первого счетчика составного черенковского ливневого спектрометра (СЧЛС) толщиной в  $1X_0$  ( $X_0$  - радиационная длина) и поперечным размером  $100 \times 100$  мм<sup>2</sup> (всего 10 счетчиков) [2], находящегося за кристаллом кремния толщиной 20 мм ( $T = 293^\circ\text{K}$ ). Диапазон энергий  $\gamma$  - квантов, падающих на кристалл, составлял  $E_\gamma = 3 \div 5$  ГэВ. Спектр 1 получен с разориентированным кристаллом,  $\Theta \geq 200$  мрад, спектр 2 – с кристаллом ориентированным осью  $\langle 110 \rangle$  на пучок  $\gamma$  - квантов,  $\Theta = 0$  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. При ориентации кристалла вдоль оси  $\langle 110 \rangle$  амплитуда спектра увеличилась с  $\langle A_p \rangle = 12$  канала до  $\langle A_0 \rangle = 18$ , а отношение амплитуд составило  $\langle A_0 \rangle / \langle A_p \rangle = 1,5$ .

Для спектров со счетчика, регистрирующего ливень за максимумом каскадной кривой, наблюдается обратная картина. Изменение формы спектра выражается в “перекачке” амплитуд из правой части спектра с большими номерами каналов в левую часть спектра с меньшими номерами каналов. На рис. 1б представлены амплитудные спектры с одинаковым числом событий с 9-го счетчика СЧЛС, находящегося за кристаллом вольфрама толщиной 1 мм ( $T = 77^\circ\text{K}$ ). Ливни развивались под действием электронов с энергией  $E_e = 28$  ГэВ. Ориентация кристалла осуществлялась вдоль оси  $\langle 111 \rangle$ , кристалл считался разориентированным при  $\Theta \geq 22$  мрад. Максимум каскадной кривой развития ливня при разориентированном кристалле приходился на 8 счетчик

СЧЛС, при ориентированном на 7. Величины средних амплитуд составили  $\langle A_p \rangle = 26$ ,  $\langle A_o \rangle = 24$ , а отношение амплитуд  $\langle A_o \rangle / \langle A_p \rangle = 0,92$ .

Для перекрывающихся спектров был введен коэффициент, который по сравнению с другими методами более чувствителен к изменению формы спектра и, следовательно, к изменению параметров ливня в зависимости от ориентации и толщины кристалла, энергии  $\gamma$  - квантов (электронов и позитронов) [2,6,9]. Под параметрами ливня понимаются спектр энерговыделения, множественность заряженных частиц и т. д. Такой коэффициент был назван - коэффициентом трансформации спектра -  $\beta$ :

$$\beta = \alpha_o / \alpha_p. \quad (1)$$

$\alpha_o$  и  $\alpha_p$  - отношение полного числа событий в правой части спектра к полному числу событий в левой части спектра относительно некоторого выбранного канала в спектрах ориентированного и разориентированного кристалла:

$$\alpha_x = N_{\text{правый}}^x / N_{\text{левый}}^x = \sum_{i=m+1}^{k_{\text{max}}^x} N_i^x / \sum_{i=k_{\text{min}}^x}^m N_i^x \quad (2)$$

где  $x = o, p$  ( $o$  – ориентированный кристалл;  $p$  – разориентированный кристалл);  $N_{\text{правый}}^x$  и  $N_{\text{левый}}^x$  – сумма числа событий в правой и левой частях спектров;  $m$  - канал, относительно которого происходит трансформация;  $N_i^x$  - число событий в  $i$  канале спектров;  $k_{\text{min}}^x$  и  $k_{\text{max}}^x$  – номера минимального и максимального каналов спектров с ненулевым числом событий. Критерием, по которому происходит выбор канала  $m$ , является одинаковое число событий в спектрах разориентированного и ориентированного кристалла  $N_m^p = N_m^o = N$ .

Критерий является оптимальным, поскольку для системы кристалл-детектор в пределах энергий  $\gamma$ -квантов и электронов в десятки ГэВ зависимость  $m$  от энергии не обнаружена. Причем, величина  $m$  не зависит от типа частицы – электрон (позитрон) или  $\gamma$ -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 имеет размер  $100 \times 100$  мм<sup>2</sup> и состоит 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. На рис. 2 показано изменение величины  $m$ , выраженного в энергетических единицах, в зависимости от толщины кристалла вольфрама с осью ориентации  $\langle 111 \rangle$  и энергиях электронов 26 ГэВ ( $T_w=293^\circ\text{K}$ ) и 28 ГэВ ( $T_w=77^\circ\text{K}$ ). Видно значительное изменение  $m$  от толщины кристалла.

На рис. 3 показано изменение коэффициента трансформации спектра  $\beta$  в зависимости от энергии  $\gamma$ -квантов, полученное при анализе амплитудных спектров, снимаемых с первого счетчика СЧЛС, перед которым находился кристалл вольфрама толщиной 1 мм ( $T_w=77^\circ\text{K}$ ), осью ориентации  $\langle 111 \rangle$ . С увеличением энергии  $\gamma$ -квантов форма спектра меняется, приводя к росту  $\beta$  - коэффициент  $\beta$  достигает  $\sim 4$  при  $\langle E_\gamma \rangle = 26$  ГэВ. Рисунок показывает увеличение чувствительности в несколько раз по сравнению с отношением амплитуд.

На рис. 4 представлены зависимости числа событий в канале  $m$  ( $N_m$ ), нормированных на полное число событий ( $N_{\text{полн}}$ ) в спектрах разориентированного и ориентированного кристалла ( $N_m/N_{\text{полн}}$ ), от толщины кристалла  $t_w$  ( $E_e = 26$  ГэВ,  $\langle 111 \rangle$ ,  $T_w=293^\circ\text{K}$ ) (кривая 1) и величины  $m$  (кривая 2). Экстраполяция величин счета в область больших  $t_w$  и  $m$  даёт возможность определить  $t_w$  и величину  $m$ , при которых спектры с разориентированного и ориентированного кристалла расходятся. Экстраполяция показывает, что спектры расходятся при  $t_w \sim 16$  мм и  $m \sim 3,6$  ГэВ.

Изменение коэффициента трансформации спектра  $\beta$  от угла ориентации кристалла кремния  $\Theta$  толщиной 20 мм относительно оси  $\langle 110 \rangle$  при энергии  $\gamma$ -квантов  $E_\gamma = 3 \div 5$  ГэВ представлено на рис. 5 [10]. Из рисунка видно, что  $\beta = 1$  для разориентированного кристалла  $\Theta = 200$  мрад, ориентация кристалла

$\Theta = 0$  мрад приводит к росту коэффициента трансформации до  $\beta = 2,4$ . Отношение средних амплитуд, как было отмечено, в этом случае составляет только  $\eta = 1,5$ .

Зависимость  $\beta$  от толщины кристалла вольфрама  $t_w$  при энергии электронов 26 ГэВ ( $T_w = 293^\circ\text{K}$ ;  $\langle 111 \rangle$ ) и 28 ГэВ ( $T_w = 77^\circ\text{K}$ ;  $\langle 111 \rangle$ ) показана на рис. 6 (кривая 1). Отношение средних амплитуд (кривая 2), начиная приблизительно с  $t_w \geq 0,3$  мм, намного меньше величин  $\beta$ . Видна сильная зависимость  $\beta$  от температуры при  $t_w = 1$  мм.

Более полно поведение  $\beta$  при продольном развитии электромагнитного ливня в детекторе для электронов с энергией 28 ГэВ и нескольких ориентациях 1 мм кристалла вольфрама относительно оси  $\langle 111 \rangle$  ( $T_w = 77^\circ\text{K}$ ) представлено на рис. 7. В данных исследованиях использовались спектрометры СЧЛС и ССЛС. За СЧЛС и ССЛС для сбора оставшейся части электромагнитного ливня помещался черенковский спектрометр (ЧС) толщиной  $15X_0$ . Из рисунка видно, что до максимума каскадной кривой ( $t_{\max} \approx 8X_0$ )  $\beta > 1$ , за максимумом  $\beta < 1$  и с  $t_{\det} \approx 10X_0$  вплоть до  $t_{\det} \approx 25X_0$  значения  $\beta$  не меняются.

В исследованиях обнаружено, что  $\beta$  зависит от типа детектора, спектры с которого анализируются. На рис 8 представлена зависимость  $\beta$  от толщины детектора, регистрирующие ливни от электронов с энергией  $E_e = 28$  ГэВ, выходящие из ориентированного кристалла вольфрама толщиной 1 мм ( $T_w=77^\circ\text{K}$ ,  $\langle 111 \rangle$ ). Видно, что существует толщина детектора  $t_{\det}$  (в данном случае толщина первого черенковского счетчика СЧЛС), при котором  $\beta$  имеет максимальное значение  $\beta = 14,3$ . Это связано с тем, что первый счетчик СЧЛС регистрирует все компоненты начала развития ливня и имеет хорошее энергетическое разрешение. Уменьшение величины  $\beta$  при увеличении  $t_{\det}$  связано со значительным “дроблением” энергии ливня на энергию вторичных частиц и их сильным многократным рассеянием по глубине детектора, ослабляющего эффект ориентации кристалла. При развитии ливня в кристалле и далее в детекторе образуется большое число низкоэнергетических фотонов, простирающихся на значительную глубину этого детектора (см. также рис.7).

Тем не менее, возможно применение детекторов значительной толщины для определения степени отличия спектра ориентированного кристалла от разориентированного. Например, была проведена ориентация кристалла вольфрама толщиной 0,07 мм ( $T_w=293^\circ\text{K}$ ,  $\langle 111 \rangle$ ) черенковским детектором толщиной  $15 X_0$ . Величина  $\beta$  составила 0,55.

Из рис. 5 и данных работы [11] видно, что ширина ориентационной зависимости коэффициента трансформации спектра  $\beta$  равна ширине ориентационной зависимости того параметра ливня, по которому и определялся коэффициент трансформации. Ширина ориентационной зависимости какого-либо параметра ливня  $\Delta\Theta$  определяется как ширина ориентационной зависимости этого параметра на половине ее высоты. Например, ширина ориентационной зависимости  $\Delta\Theta_\beta$  на рис. 5 практически равна ширине ориентационной зависимости энерговыделения из того же кристалла кремния 20 мм и составляет  $\Delta\Theta_{\Delta E} = \Delta\Theta_\beta \approx 4$  мрад [11]. Кроме того, форма кривой 1 на рис. 3 соответствует форме зависимости средней множественности заряженных частиц, выходящих из кристалла вольфрама 1 мм при  $\Theta = 0,9$  мрад (угол близкий к углу ориентации вдоль оси  $\langle 111 \rangle$ ) [11].

Таким образом, интенсивное развитие ливня в ориентированном кристалле приводит к изменению формы отклика детектора по отношению к обычному ливню. Несмотря на то, что коэффициент  $\beta$  не является фундаментальной величиной, поскольку зависят от характеристик детектора, его использование даёт возможность определять степень отличия аномальных ливней от обычных.  $\beta$  можно использовать для определения степени отличия обычных ливней при изменении, например, энергии частиц или толщины аморфного конвертора перед детектором.

Авторы выражают благодарность Е.И. Тамму и Е.И. Малиновскому за поддержку работы, В.И. Сергиенко за практическое руководство, 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. *Baskov V.A., Khablo V.A., Kim V.V. et al.*// Nucl. Instrum. and Methods. 1998. V. **B145**. P. 92.
4. *Kirsebom K., Kononets Yu.V., Mikkelsen U. et al.*// Nucl. Instrum. And Methods. 1998. V. **B135**. P. 143.
5. *Baier V.N., Strakhovenko V.M.*// Preprint Budker INP. №14. Novosibirsk. 2002.
6. *Басков В.А., Ким В.В., Лучков Б.И. и др.* // Препринт ФИАН. №14. Москва. 2005.
7. *Басков В.А., Ким В.В., Лучков Б.И. и др.*// Препринт ФИАН. №31. Москва. 2006.
8. *Басков В.А., Ким В.В., Сергиенко В.И., Хабло В.А.* // ПТЭ. 1990. №5. С. 58.
9. *Басков В.А., Ганенко В.Б., Гуцин В.А. и др.*// Письма в ЖЭТФ. 1990. №52. С. 740.
10. *Басков В.А., Ганенко В.Б., Гуцин В.А. и др.*// ПТЭ. 1992. №5. С. 52.
11. *Басков В.А., Ким В.В., Лучков Б.И. и др.* // Препринт ФИАН. №9. Москва. 2005.

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ:

**Рис. 1** Амплитудные спектры сигналов со счетчиков СЧЛС:

**а** – 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).

**б** – с девятого счетчика СЧЛС, стоящего за кристаллом вольфрама ( $t_w = 1$  мм;  $T = 77^\circ\text{K}$ ;  $E_e = 28$  ГэВ): 1 – кристалл разориентирован ( $\Theta \geq 22$  мрад); 2 – кристалл ориентирован вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  ( $\Theta = 0$  мрад).

**Рис. 2** Зависимость канала трансформации спектра  $m$  от толщины кристалла вольфрама с осью ориентации  $\langle 111 \rangle$ : ● -  $E_e = 26$  ГэВ ( $T_w = 293^\circ\text{K}$ ); ■ -  $E_e = 28$  ГэВ ( $T_w = 77^\circ\text{K}$ ; СЧЛС); □ -  $E_e = 28$  ГэВ ( $T_w = 77^\circ\text{K}$ ; ССЛС); о – вольфрам перед детектором отсутствует.

**Рис. 3** Зависимость коэффициента трансформации спектра  $\beta$  (● - кривая 1) и отношения средних амплитуд по спектрам разориентированного и ориентированного кристалла  $\langle A_o \rangle / \langle A_p \rangle$  (■ - кривая 2) от энергии  $\gamma$ -квантов ( $t_w = 1$  мм;  $T = 77^\circ\text{K}$ ; ось ориентации  $\langle 111 \rangle$ ).

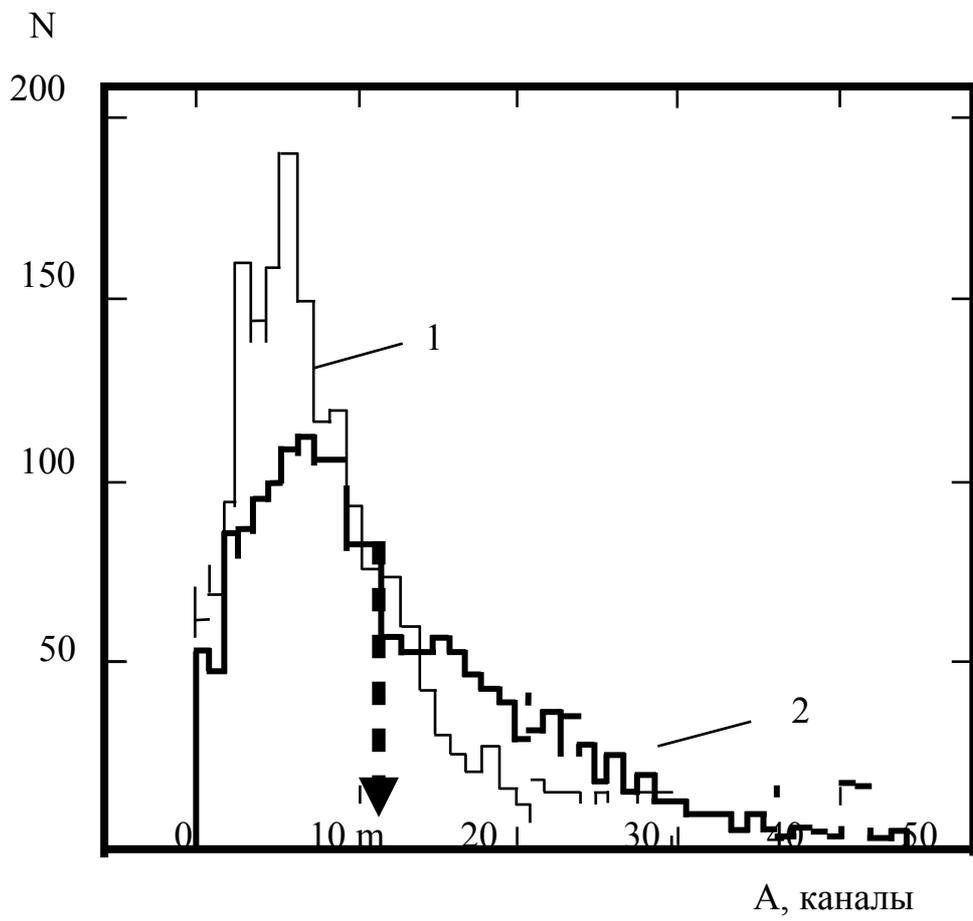
**Рис. 4** Зависимости числа событий в канале  $m$  ( $N_m / N_{\text{поллн}}$ ), нормированных на полное число событий в спектрах разориентированного и ориентированного кристалла, от толщины кристалла вольфрама (кривая 1) и величины  $m$  (кривая 2) ( $T_w = 293^\circ\text{K}$ ;  $E_e = 26$  ГэВ; ось ориентации  $\langle 111 \rangle$ ).

**Рис. 5** Зависимость коэффициента трансформации спектра  $\beta$  от угла ориентации  $\Theta$  ( $t_{Si} = 20$  мм;  $T = 293^\circ\text{K}$ ;  $E_\gamma = 3 \div 5$  ГэВ; ось ориентации  $\langle 110 \rangle$ ).

**Рис. 6** Зависимость  $\beta$  (■, ▲, ●) и отношения средних амплитуд по спектрам разориентированного и ориентированного кристалла  $\langle A_o \rangle / \langle A_p \rangle$  (□, Δ, о) от толщины кристалла вольфрама (■, □, ●, о -  $T_w = 293^\circ\text{K}$ ; ▲, Δ -  $T_w = 77^\circ\text{K}$ ;  $\langle 111 \rangle$ ): ●, о -  $E_e = 26$  ГэВ; ■, □, ▲, Δ -  $E_e = 28$  ГэВ.

**Рис. 7** Зависимость  $\beta$  от толщины детекторов СЧЛС (о) и ССЛС (●, ■, ▲), помещающихся за кристаллом вольфрама, и угла ориентации кристалла относительно оси  $\langle 111 \rangle$  ( $t_w = 1$  мм;  $T_w = 77^\circ\text{K}$ ;  $E_e = 28$  ГэВ): о, ● - 0 мрад; ■ - 2 мрад; ▲ - 4 мрад.

**Рис. 8** Зависимость  $\beta$  от толщины детектора, регистрирующего ливни, выходящие из ориентированного кристалла ( $t_w = 1$  мм;  $T_w = 77^\circ\text{K}$ ;  $E_e = 28$  ГэВ; ось ориентации  $\langle 111 \rangle$ ): о - сцинтилляционный счетчик толщиной 5 мм; ● - СЧЛС; ■ - ССЛС.



**Рис. 1а**

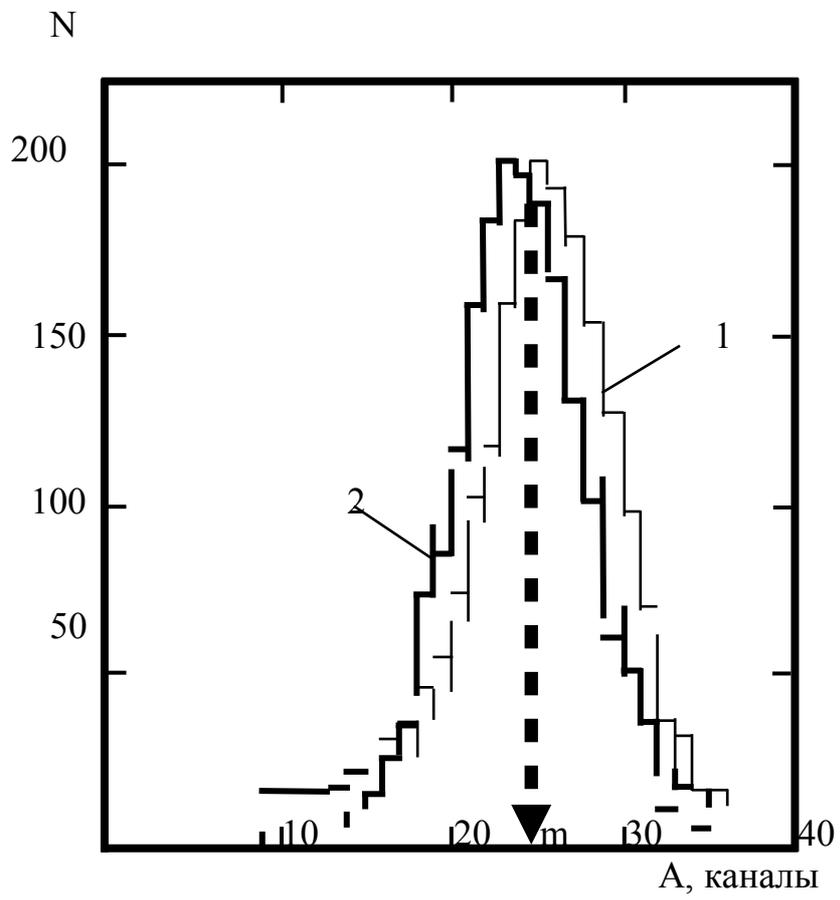


Рис. 16

m, ГэВ

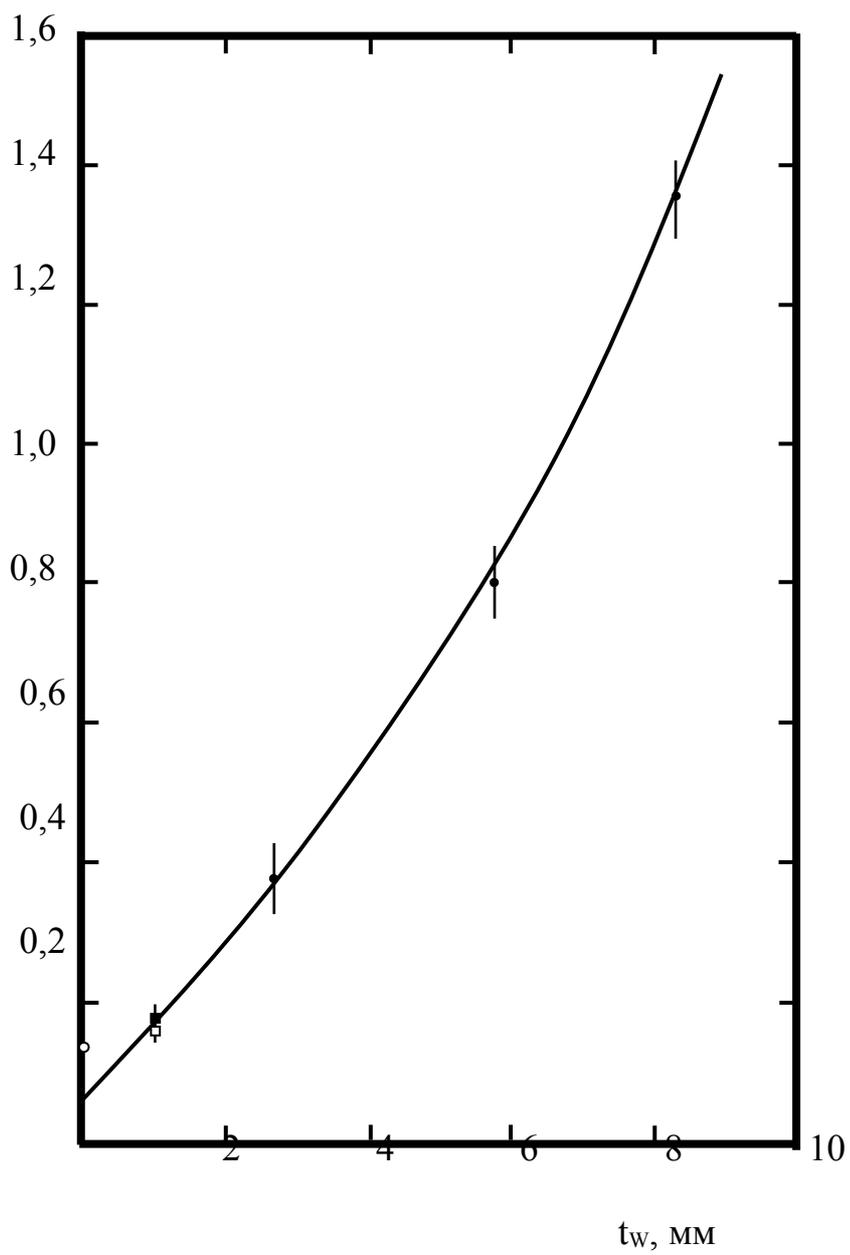


Рис. 2

$\beta$

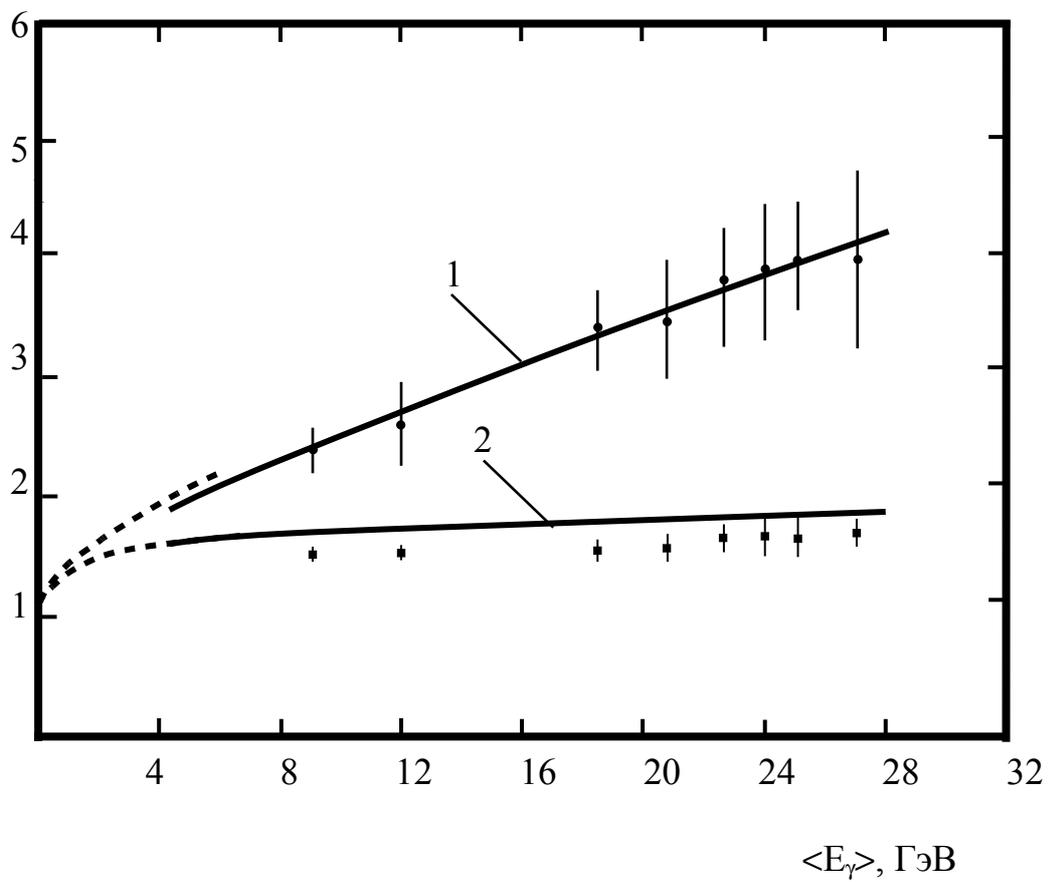
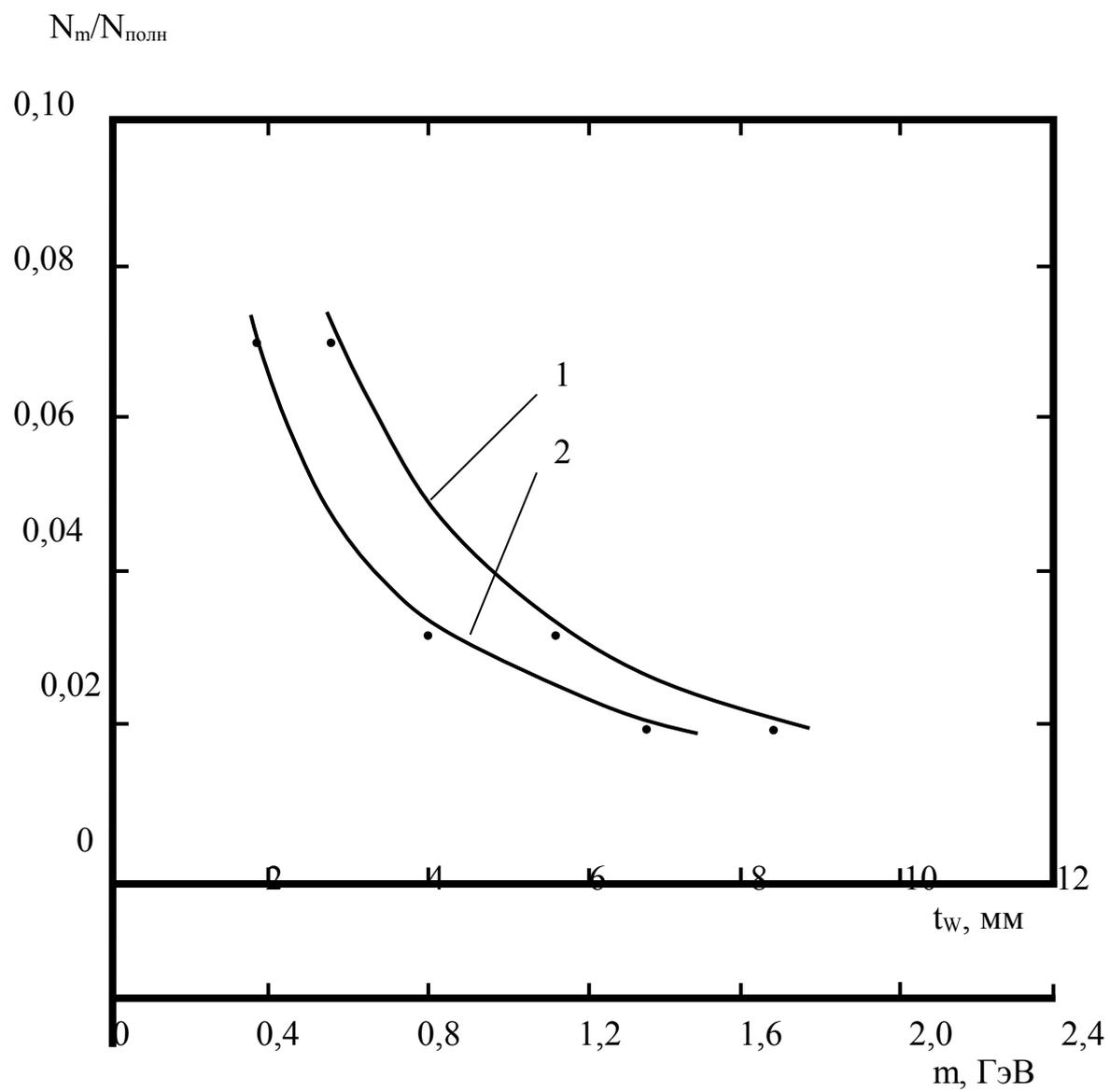


Рис. 3



**Рис. 4**

$\beta$

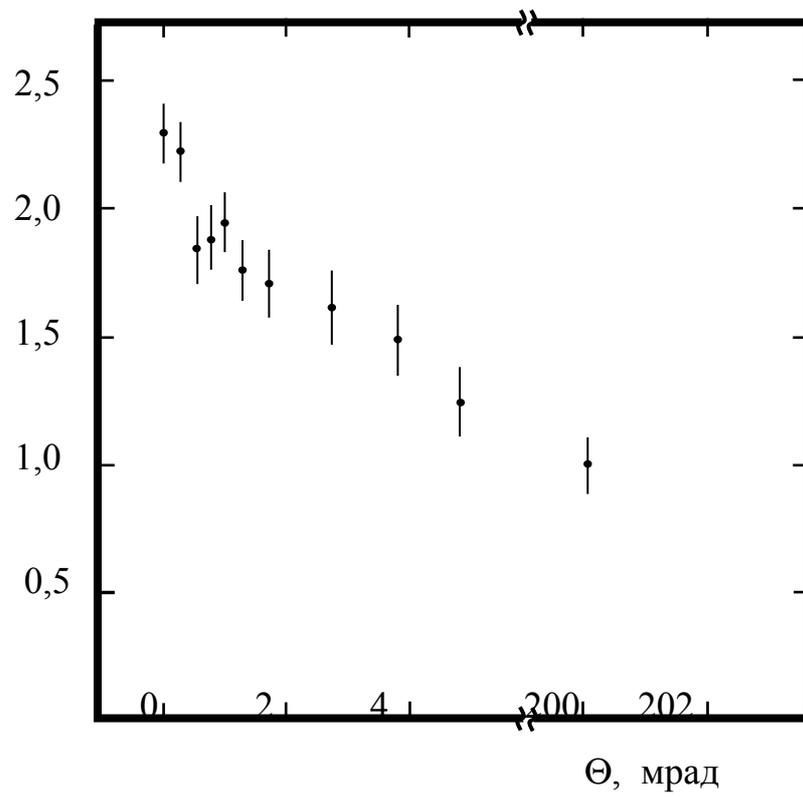
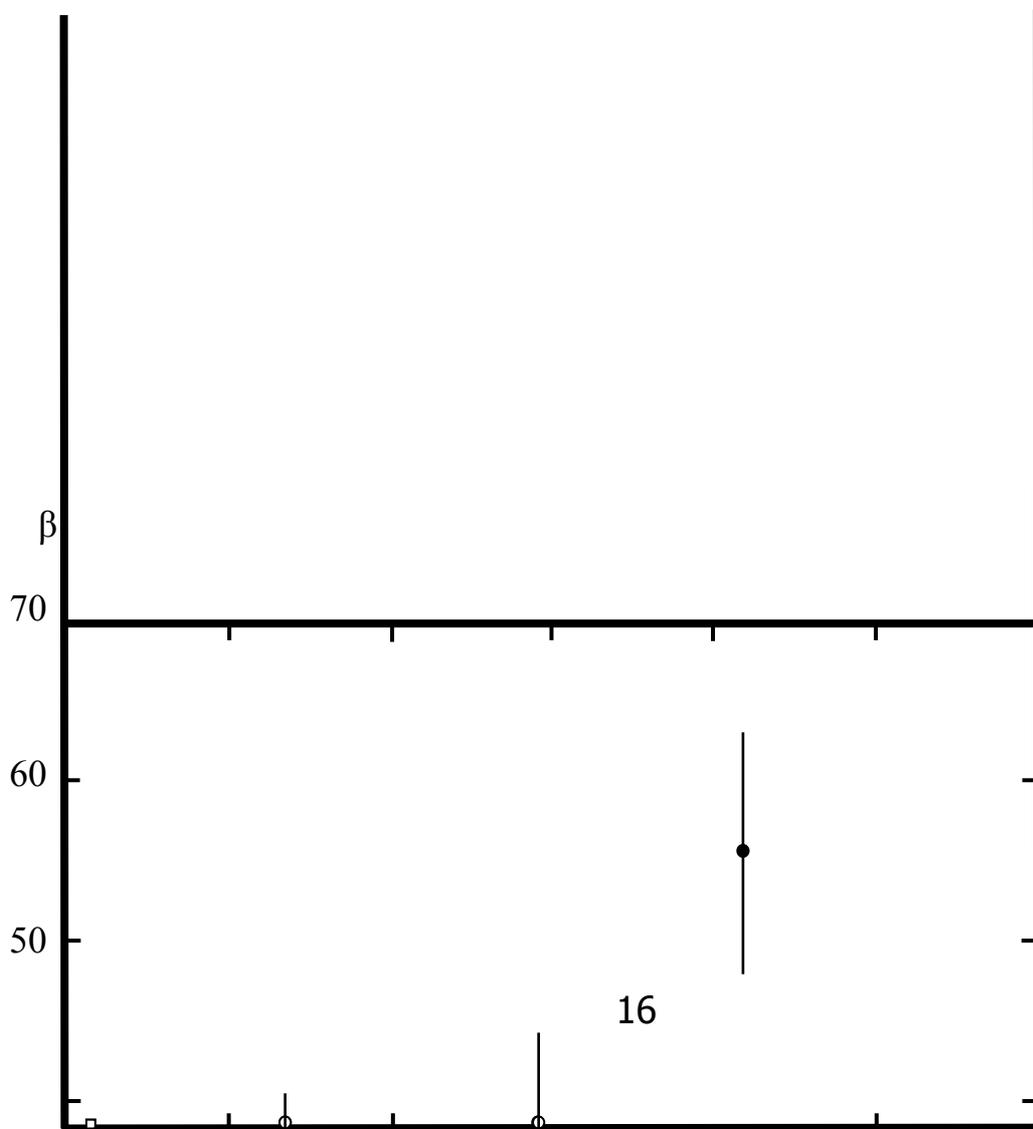
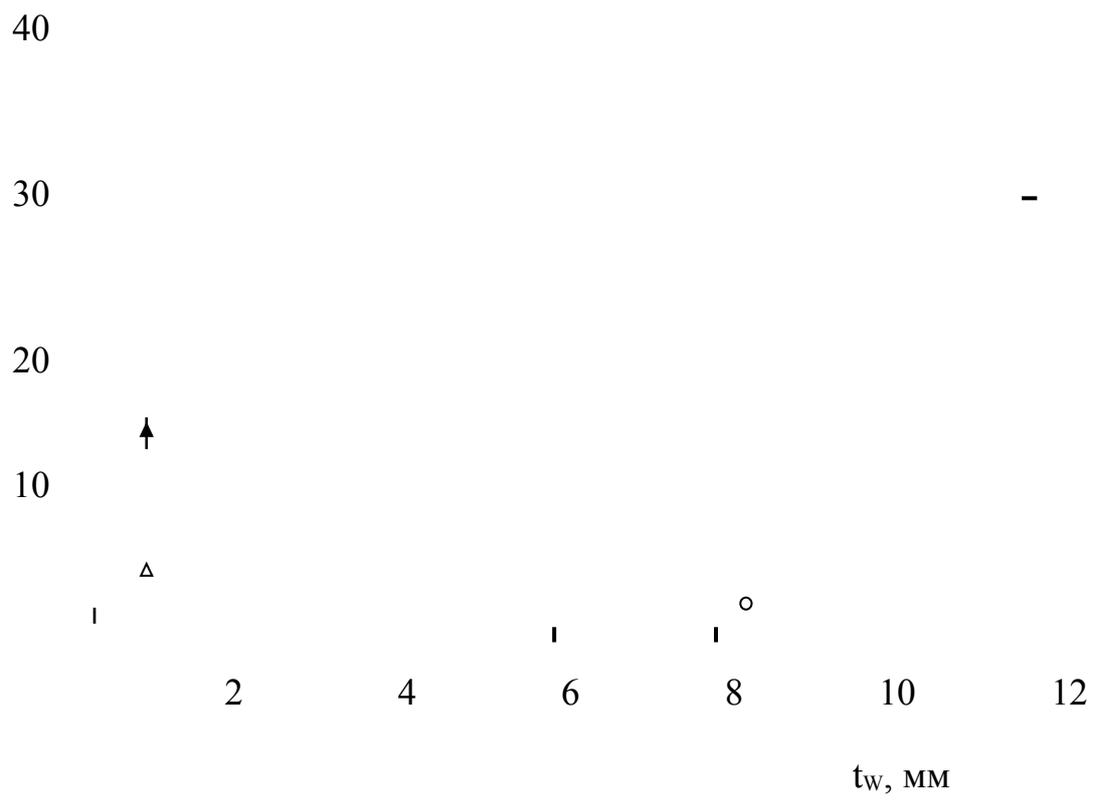
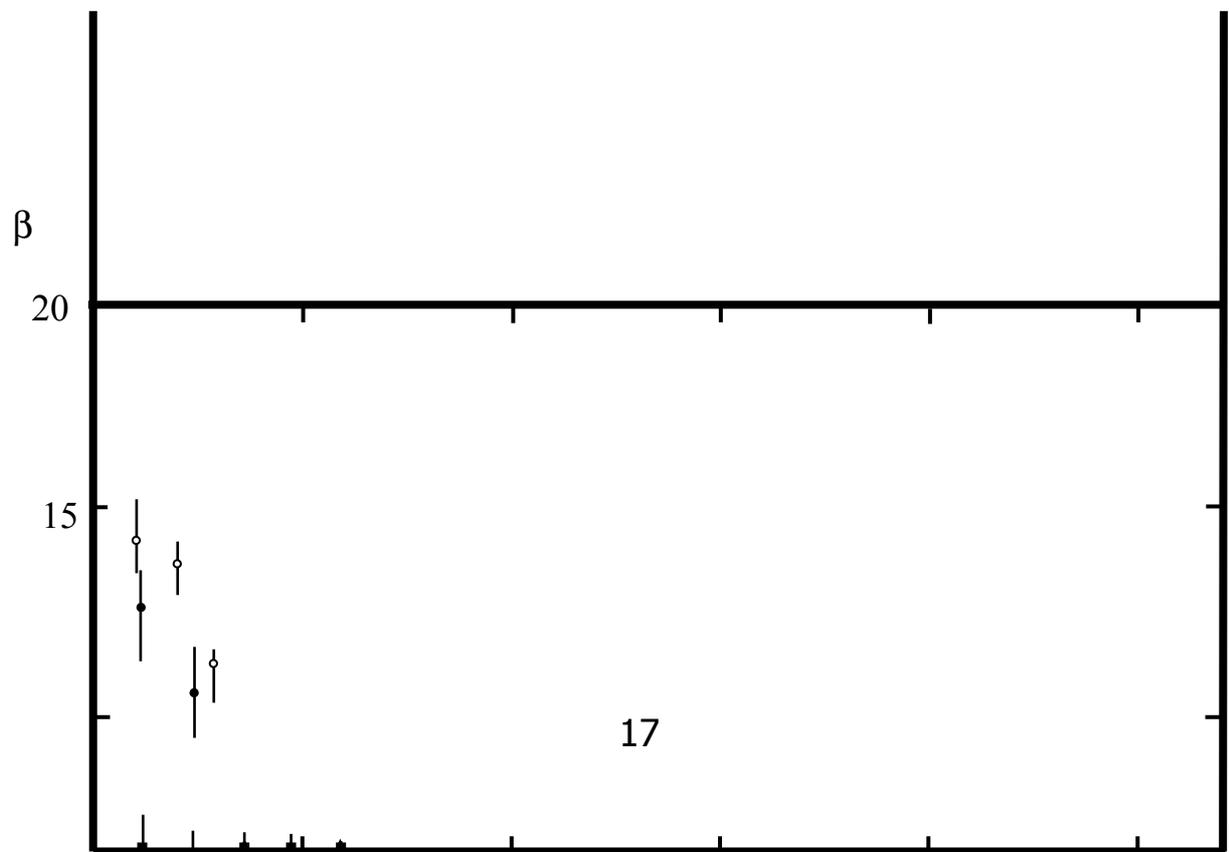


Рис. 5





**Рис. 6**



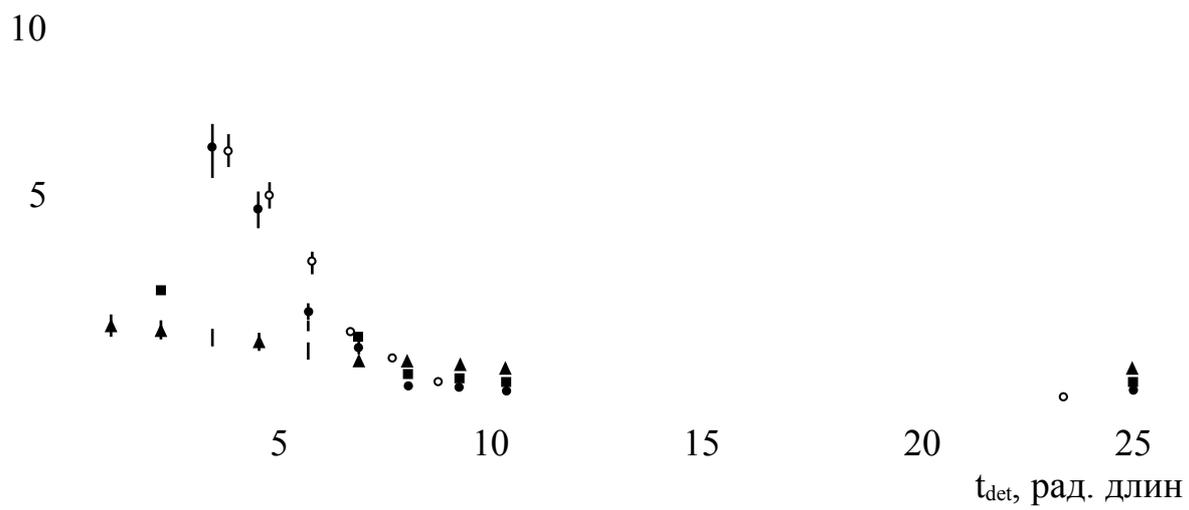


Рис. 7

