

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.08

ЧЕТЫРЕХКАНАЛЬНЫЙ АМПЛИТУДНО-КООРДИНАТНЫЙ
СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР

©2026 г. В. И. Алексеев^a, С. М. Ахмад^{a,b}, В. А. Басков^{a,*}, В. А. Дронов^a,
А. И. Львов^a, А. В. Кольцов^a, В. В. Полянский^a, С. С. Сидорин^a

^a Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, 53

^b Московский педагогический государственный университет
Россия, 119435, Москва, Малая Пироговская улица, 1, стр. 1

*e-mail: baskov@x4u.lebedev.ru

Поступила в редакцию 22.02.2026 г.

После доработки 10.03.2026 г.

Принята к публикации 20.03.2026 г.

Представлены результаты калибровки на пучке вторичных электронов ускорителя “Пахра” Физического института им. П.Н. Лебедева РАН четырехканального амплитудно-координатного сцинтилляционного спектрометра толщиной $0.36X_0$, включающего амплитудную и временную системы регистрации на основе фотоэлектронных умножителей ФЭУ-49 и ФЭУ-87 соответственно. Минимальное относительное энергетическое разрешение сцинтилляционного спектрометра составило $\delta \sim 12\%$ при энергии электронов $E \sim 30$ МэВ. В диапазоне энергий электронов от 12 до 47 МэВ координатное разрешение в центре спектрометра составило $\sigma \sim 1.3$ см. Обнаружена сложная зависимость среднего канала временного спектра от энергии электронов.

Ключевые слова: сцинтилляционный спектрометр, электронный пучок, энергетическое разрешение, временное разрешение

На тормозном пучке фотонов ускорителя С-25Р “Пахра” ФИАН с энергией до 500 МэВ создана экспериментальная установка, предназначенная для поиска ранее не наблюдавшихся относительно легких долгоживущих заряженных частиц с массой, меньшей массы мюона, но большей массы электрона, — так называемых аномальных лептонов [1, 2].

Для определения импульса и энергии частиц, вылетающих из мишени, используется времяпролетная методика. Электрон и более тяжелый лептон при одинаковом импульсе будут различаться скоростями и, соответственно, разными временами пролета от мишени до

точки регистрации. Поэтому установка включает системы, определяющие время пролета, импульс и энергию регистрируемых частиц.

Энергия частиц, вылетевших из мишени, находится в сепарируемом магнитом диапазоне до 50 МэВ. Для их регистрации используется сцинтилляционный спектрометр (СС). Модельные расчеты показывают, что для надежного выделения энергетического пика аномальных лептонов точность определения энергии регистрируемых СС частиц должна составлять примерно 10–12%. В процессе эксперимента конструкция СС постоянно совершенствуется с целью получения требуемой точности [3, 4].

В работе представлены характеристики новой конструкции четырехканального амплитудно-координатного сцинтилляционного спектрометра (ЧАКСС), предназначенного для регистрации заряженных частиц, определения энергии и координаты входа частицы в спектрометр (рис. 1). ЧАКСС является сцинтилляционным блоком размером $510 \times 235 \times 145$ мм³, на основе которого выполнены исследования, представленные в работах [3, 5].

Рис. 1. Схема четырехканального амплитудно-координатного сцинтилляционного спектрометра (ЧАКСС)

Регистрация световых вспышек, возникающих от взаимодействия заряженных частиц с блоком, входящих в спектрометр по центру грани размером 510×235 мм², осуществляется с помощью фотоэлектронных умножителей ФЭУ-49 и ФЭУ-87 со стандартными делителями напряжения. Радиационная длина блока при таком варианте входа заряженных частиц составляет $0.36X_0$, где X_0 – радиационная длина (для пластического сцинтиллятора $X_0 \approx 40$ см [6]).

ЧАКСС включает амплитудную и координатную системы. Амплитудная система состоит из двух фотоэлектронных умножителей ФЭУ-49 (C_1 и C_2), просматривавших сцинтилляционный блок 1 с двух противоположных граней размером 145×235 мм². ФЭУ без смазки плотно прижаты к граням блока. В качестве отражателя света использована бумага для копирования 2, за исключением части боковых граней, занятых фотокатодами ФЭУ-49 и ФЭУ-87.

Координатная система состоит из двух ФЭУ-87 (S_{t1} и S_{t2}), расположенных рядом с ФЭУ-49 и просматривающих сцинтилляционный блок с двух противоположных граней. ФЭУ-87 также без смазки плотно прижаты к граням блока.

ФЭУ-49 были отобраны по коэффициентам усиления и минимальному относительному амплитудному разрешению. ФЭУ-87 были отобраны по критерию наилучшего временного разрешения, определяемого по полной ширине на половине высоты временного спектра при регистрации космических мюонов на установки отбора ФЭУ.

Блок-схема калибровки ЧАКСС представлена на рис. 2. Сигналы с триггерных счетчиков S_1 и S_2 размером $15 \times 15 \times 1$ мм³ через блоки формирователей Φ_1 , Φ_2 и блоки задержек Z_1 , Z_2 подавались на входы схемы совпадений (СС). Длительность сигналов составляла 10 нс. Сигнал со схемы совпадений длительностью 350 нс являлся триггерным сигналом *Start* для запуска четырех входных блоков зарядно-цифрового преобразователя (ЗЦП) и время-цифрового преобразователя (ВЦП). На входы *Stop* блока ВЦП через блоки формирователей Φ_3 – Φ_5 и блоки задержек Z_3 – Z_5 подавались сигналы от ФЭУ-87 координатной системы S_{t1} , S_{t2} и счетчика S_3 размером $10 \times 10 \times 1$ см³. На входы ЗЦП через блоки задержек Z_6 и Z_7 подавались сигналы от двух ФЭУ-49 амплитудной системы C_1 и C_2 . Сигнал *Start* являлся также сигналом, с помощью которого через крейт-контролер (КК) системы сбора данных САМАС осуществлялась запись сигналов в память компьютера (ПС).

Рис. 2. Блок-схема калибровки ЧАКСС

Калибровка ЧАКСС выполнена на тестовом канале квазимонохроматического вторичного электронного пучка ускорителя С-25Р “Пахра” ФИАН на основе спектрометрического магнита СП-3 с диапазоном энергий от 5 до 100 МэВ [7]. Целью калибровки являлось определение энергетической зависимости и энергетического разрешения, а также координатные характеристики ЧАКСС от энергии электронного пучка.

Вторичный электронный пучок формировался с помощью медного конвертора диаметром $\varnothing 3.2$ мм и толщиной 2 мм. Электроны, выходящие из конвертора, отклонялись магнитным полем магнита СП-3 под углом 23° в свинцовый коллиматор К диаметром $\varnothing 15$ мм и регистрировались сцинтилляционными счетчиками S_1 и S_2 размером $15 \times 15 \times 1$ мм³. Интенсивность электронного пучка составляла около $50 e^-/с$. Счетчик S_3 , расположенный за ЧАКСС, предназначен регистрации оставшейся части электромагнитного ливня, развивающегося в сцинтилляционном блоке. Сигнал от счетчика S_3 в триггер не входил, но записывался в базу данных для последующей обработки.

Калибровка ЧАКСС на пучке электронов проходила в два этапа. На первом этапе последовательно на пучке электронов с энергией более 30 МэВ, при которой происходит максимальное энерговыделение ливней в объеме ЧАКСС, были выравнены амплитуды сигналов обоих ФЭУ-49 таким образом, чтобы амплитудный спектр от каждого ФЭУ был расположен в рабочей области ЗЦП. Выравнивание амплитуд сигналов происходило путем изменения величин напряжения на делителях напряжения обоих ФЭУ-49.

Суть процедуры первого этапа определяется тем, что полное среднее энерговыделение, которое оставляет электрон в объеме ЧАКСС при прохождении пути, равного толщине спектрометра 23.5 см, составляет около $E \approx L \cdot dE/dx = 23.5 \cdot 2 \approx 47$ МэВ ($L =$

23.5 см – толщина ЧАКСС, $dE/dx \approx 2$ МэВ/см – средняя величина ионизационных потерь электронов на единицу пути в пластиковом сцинтилляторе). Поэтому при увеличении энергии электронов более 47 МэВ увеличение энергосодержания в ЧАКСС не происходит и средний канал, определяющий среднее энергосодержание ливней в ЧАКСС, не изменяется [3–7].

На рис. 3а представлена зависимость средней величины энергии, зарегистрированной ЧАКСС от тока магнита СП-3. В диапазоне токов от 5 до 20 А в пределах ошибок зависимость имеет линейный характер. При токах менее 5 А наблюдается нелинейная область, обусловленная значительным низкоэнергетическим электромагнитным фоном. Энергия электронов определялась стандартной процедурой, представленной в работах [5–7].

На рис. 3б представлена зависимость относительного энергетического разрешения спектрометра ЧАКСС ($\delta = FWHM/\langle E \rangle / 2.35 \cdot 100\%$) от энергии электронного пучка без вычета относительного энергетического разрешения электронного пучка, разрешение которого в диапазоне от 5 до 20 МэВ составляет примерно 8% [7]. Минимальное относительное энергетическое разрешение наблюдается при энергии электронов $E \approx 30$ МэВ и составляет $\delta \approx 12\%$, что примерно на 3% хуже разрешения спектрометра подобной конструкции [6].

Рис. 3. Зависимости средней энергии электронов, зарегистрированной ЧАКСС, от тока магнита СП-3...

На рис. 4 представлены зависимости среднего канала временного спектра одного из каналов временной системы ЧАКСС $\langle T_1 \rangle$ и среднеквадратичного разрешения временного спектра ΔT_1 от энергии электронов. Ошибки значений на графике рис. 4а, составляющие от 50 до 100 каналов (рис. 4б), не показаны, чтобы не перегружать график. Характер зависимости на рис. 4а аналогичен характерам зависимостей в работах [6, 7], в которых представлены временные характеристики сцинтилляционного и водного черенковского спектрометров. Минимальное временное разрешение наблюдается при энергии электронов около 17 МэВ и составляет примерно 50 каналов. При цене канала ВЦП 90 пс/канал минимальное разрешение составляет $90 \cdot 50 = 4500$ пс.

Рис. 4. Зависимости среднего канала временного спектра...

Координаты вхождения электронов в ЧАКСС при расположении триггерных счетчиков по центру грани 510×235 мм², определялась формулой

$$x_i = (x_{1i} + x_{2i})/2,$$

где x_{1i} , x_{2i} – координаты положения источника, определенные по времени прихода света от точки взаимодействия электрона со спектрометром до каждого из временных ФЭУ

$$x_{1i(2i)} = x_0(1 - t_{1i(2i)}/\langle t_{1i(2i)} \rangle),$$

где x_0 – центр спектрометра ($x_0 = 25.5$ см), $t_{1i(2i)}$ – время прохождения света от точки взаимодействия электрона со спектрометром до первого (второго) фотокатода ФЭУ, измеренное с помощью ВЦП, $\langle t_{1i(2i)} \rangle$ – среднее время прохождения света от точки входа в спектрометр до фотокатода ФЭУ, являющееся средним каналом временного спектра первого (второго) ФЭУ.

На рис. 5 представлено распределение координат, определенных ЧАКСС, при энергии электронов $E = 25.5$ МэВ и координатное разрешение ЧАКСС в зависимости от энергии электронов (горизонтальный размер триггерных счетчиков $l = 1.5$ см вычтен). В диапазоне энергий примерно от 12 до 47 МэВ координатное разрешение ЧАКСС составляет около 1.3 см. В нелинейной нерабочей области энергий электронов менее 12 МэВ координатное разрешение резко ухудшается и увеличивается до примерно 5 см.

Рис. 5. Распределение координат, определенных ЧАКСС, ...

Надо отметить, что на рис. 3–5 линии, описывающие экспериментальные результаты, проведены для наглядности. Погрешности значений на этих рисунках определялись аппроксимацией амплитудных и координатных спектров полиномом, полученным в рамках стандартной программы OriginPro 9.0, и составили 15–20% от значений величин, представленных на рисунках.

Результаты калибровки четырехканального сцинтилляционного время-координатного спектрометра на пучке вторичных электронов ускорителя С-25Р “Пахра” ФИАН показали, что при входе электронов в спектрометр по центру грани размером 510×235 мм² относительное энергетическое разрешение составляет около 12%. Координатное разрешение спектрометра в диапазоне энергий электронов примерно от 12 до 47 МэВ меняется незначительно и составляет около 1.3 см. В диапазоне нерабочих энергий менее 12 МэВ координатное разрешение резко ухудшается, достигая величины около 5 см. В работе [3], в которой с помощью космических мюонов исследовалось координатное разрешение спектрометра на основе данного сцинтилляционного блока в горизонтальном направлении вдоль оси OX (рис. 1), получено, что в диапазоне длин от -25.5 до $+25.5$ см координатное разрешение изменяется незначительно: от 1.6 см в центре до примерно 1.8 см вблизи боковых граней. В целом можно считать, что среднее координатное разрешение спектрометра составляет около 1.5 см. Таким образом, спектрометр способен определять энергию заряженных частиц в области энергий менее 50 МэВ с точностью около 12% при координатном разрешении примерно 1.5 см и может быть использован в установке для дальнейшего поиска аномальных лептонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аникина М.Х., Никитин В.А., Рихвицкий В.С.* Поиск новой заряженной частицы в интервале массы 2–140 МэВ. Препринт ОИЯИ. Р1-022-62, Дубна, 2023.
2. *Alekseev V.I., Baskov V.A., Dronov V.A. et al.* // EPJ Web of Conferences (Baldin ISHEPP XXIV) 2019. V. 204. P. 08009. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201920408009> .
3. *Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А. и др.* // ПТЭ. 2024. № 3. С. 4. <https://elibrary.ru/item.asp?id=77095332>
4. *Ахмад С.М., Алексеев В.И., Басков В.А. и др.* // Кр. сообщения по физике ФИАН. 2025. № 3. С. 19. <https://elibrary.ru/item.asp?id=80330968>
5. *Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А. и др.* // ПТЭ. 2021. №1. С. 40. <https://doi.org/10.31857/S003281622101002X> .
6. *Калиновский А.Н., Мохов Н.В., Никитин Ю.П.* Прохождение частиц высоких энергий через вещество. Москва: Энергоатомиздат, 1985.
7. *Алексеев В.И., Архангельский А.И., Басков В.А. и др.* // ПТЭ. 2023. № 6. С. 59. <https://doi.org/10.31857/S0032816223040109> .

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схема четырехканального амплитудно-координатного сцинтилляционного спектрометра (ЧАКСС) (светонепроницаемый корпус не показан): S_1 – S_3 – сцинтилляционные счетчики, C_1 и C_2 – ФЭУ-49 амплитудной системы, S_{t1} и S_{t2} – ФЭУ-87 временной системы, 1 – сцинтилляционный блок, 2 – отражатель из бумаги для копирования, 3 – черная бумага, 4 – металлический каркас, 5 и 6 – делители напряжения ФЭУ-87 и ФЭУ-49 соответственно (коллиматор К на рисунке отсутствует).
- Рис. 2.** Блок-схема калибровки ЧАКСС: К – коллиматор, S_1 и S_2 – триггерные сцинтилляционные счетчики, S_3 – сцинтилляционный счетчик контроля доли энергии электромагнитного ливня, выходящего из ЧАКСС, ЧАКСС – четырехвходовой амплитудно-координатный сцинтилляционный спектрометр, Φ_1 – Φ_5 – блоки формирователей, Z_1 – Z_7 – блоки задержек, СС – схема совпадений, ЗЦП – зарядно-цифровой преобразователь, ВЦП – время-цифровой преобразователь, *Start* – сигнал запуска блоков ЗЦП и ВЦП, *Stop* – временные сигналы со счетчиков S_1 , S_2 и S_3 . Анализ – амплитудные сигналы с каналов ЧАКСС, КК – крейт-контроллер системы САМАС, ПС – персональный компьютер.
- Рис. 3.** Зависимости средней энергии электронов, зарегистрированной ЧАКСС, от тока магнита СП-3 (а) и относительного энергетического разрешения спектрометра ЧАКСС от энергии электронного пучка (б).
- Рис. 4.** Зависимости среднего канала временного спектра $\langle T_1 \rangle$ (а) и среднеквадратичного разрешения временного спектра ΔT_1 (б) первого ФЭУ временной системы ЧАКСС от зарегистрированной энергии электронов.
- Рис. 5.** Распределение координат, определенных ЧАКСС, при энергии электронов $E = 25.5$ МэВ (а) и координатное разрешение ЧАКСС (б) в зависимости от энергии электронов (горизонтальный размер триггерных счетчиков $l = 1.5$ см вычтен).

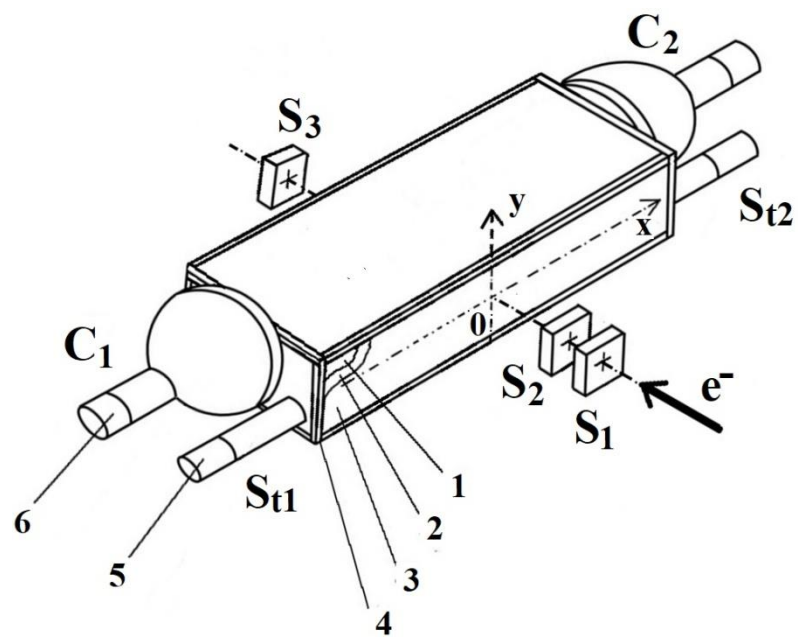


Рис. 1.

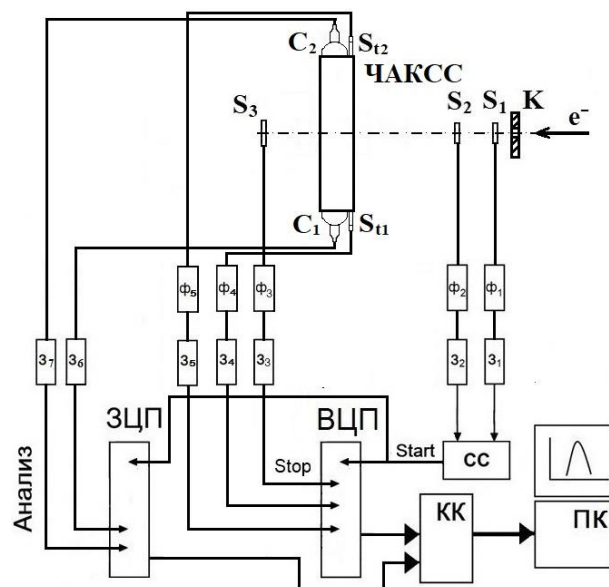


Рис. 2.

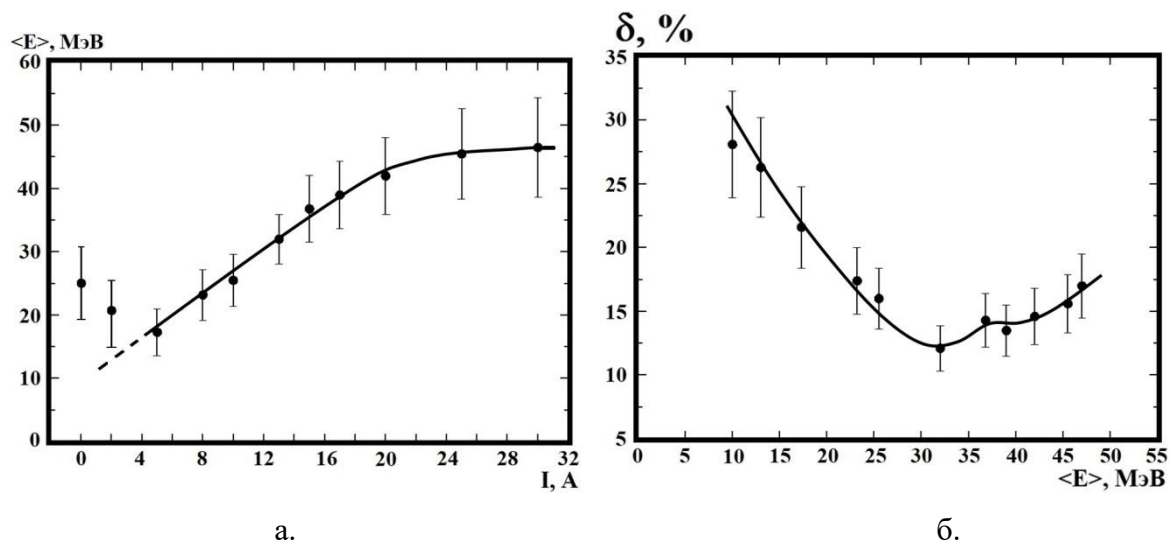
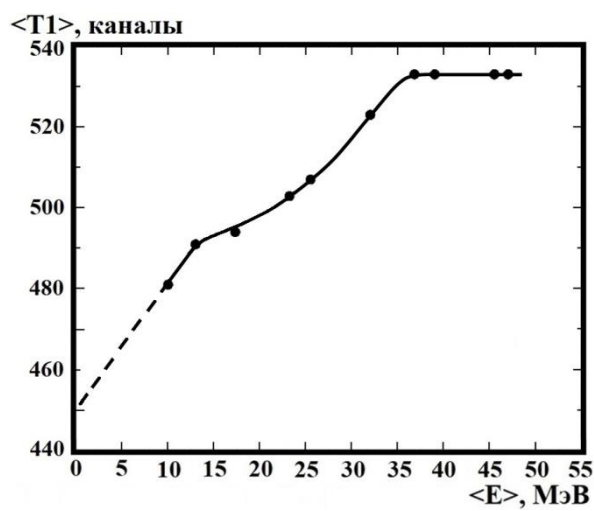
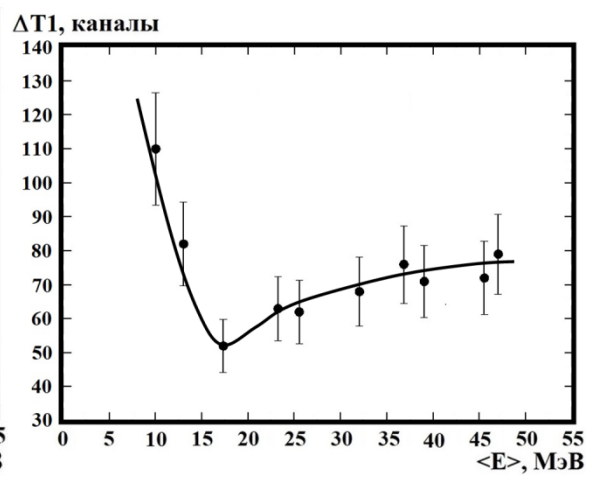


Рис. 3.

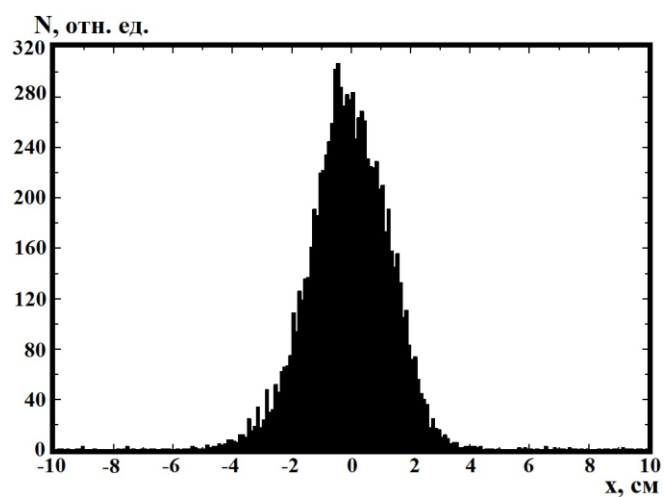


а.

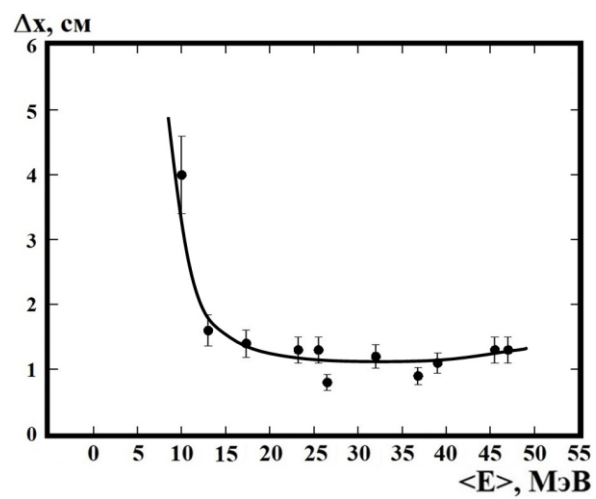


б.

Рис. 4.



(a)



(б)

Рис. 5.