

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.08

АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННОЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ
СПЕКТРОМЕТР

©2025 г. С. М. Ахмад^{a, b}, В. И. Алексеев^a, В. А. Басков^{a, *}, В. А. Дронов^a,
А. И. Львов^a, А. В. Кольцов^a, Ю. Ф. Кречетов^c, В. В. Полянский^a,
С. С. Сидорин^a, Е. А. Хафизова^a

^a Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук

Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

^b Московский педагогический государственный университет

Россия, 119435, Москва, Малая Пироговская ул., 1, стр. 1

^c Объединенный институт ядерных исследований,

Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

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

Поступила в редакцию 19.03.2025 г.

После доработки 17.04.2025 г.

Принята к публикации 12.05.2025 г.

Представлены результаты калибровки на пучке вторичных электронов ускорителя “Пахра” Физического института им. П.Н. Лебедева РАН сцинтилляционного спектрометра толщиной $0.5X_0$, включающего амплитудную и временную системы регистрации на основе фотоэлектронных умножителей ФЭУ-49 и ФЭУ-85 соответственно. При энергии электронов $E \sim 30$ МэВ относительное энергетическое разрешение сцинтилляционного спектрометра составило примерно 5%. При энергии электронов $E < 40$ МэВ обнаружена нелинейная зависимость среднего канала временного спектра от энергии электронов, при $E \geq 40$ МэВ величина среднего канала временного спектра от энергии не зависит.

1. ВВЕДЕНИЕ

На тормозном пучке фотонов ускорителя С-25Р “Пахра” ФИАН с максимальной энергией 500 МэВ создана установка, предназначенная для поиска ранее не наблюдавшихся, относительно легких долгоживущих заряженных частиц $\ell^\pm$ с массой, большей массы электрона, но меньшей массы мюона или “аномальных лептонов” [1].

Энергии частиц, вылетевших из мишени и сепарируемых магнитом установки, находятся в диапазоне до 50 МэВ. Для их регистрации используются сцинтилляционные спектрометры (рис. 1) [2]. Модельные расчеты показали, что для надежного выделения энергетического пика “аномальных лептонов” точность определения энергии регистрируемых сцинтилляционным спектрометром частиц должна составлять менее 10%.

Рис. 1. Схема экспериментальной установки по поиску “тяжелого лептона” на ускорителе ФИАН “Пахра...”

В процессе эксперимента конструкция спектрометров постоянно совершенствуется с целью получения требуемой точности [3, 4]. В работе представлены характеристики новой конструкции одного из сцинтилляционных спектрометров, предназначенного для регистрации заряженных частиц и определения их энергии (рис. 2).

2. АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННОЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР

Основой амплитудно-временного сцинтилляционного спектрометра (АВСС), являющегося развитием конструкции двухканального сцинтилляционного спектрометра (ДСС2) [4], является сцинтилляционный блок размером $200 \times 200 \times 200$ мм³ [5]. Регистрация световых вспышек, возникающих от взаимодействия заряженных частиц с блоком, осуществляется с помощью двух фотоэлектронных умножителей ФЭУ-49 (амплитудная система) и одного ФЭУ-85 (временная система) со стандартными делителями напряжения.

ФЭУ двухканальной амплитудной системы АВСС расположены таким образом, чтобы траектории ливневых частиц электромагнитного ливня, развиваемого в блоке, были параллельны фотокатодам ФЭУ (рис. 2). Оба ФЭУ-49 плотно без смазки прижаты к граням сцинтилляционного блока. Один ФЭУ расположен на верхней грани сцинтилляционного блока и “просматривает” объем блока в направлении вертикальной оси симметрии (первый канал), второй ФЭУ расположен на горизонтальной грани сцинтилляционного блока параллельной траектории регистрируемых частиц и “просматривает” объем блока в направлении горизонтальной оси симметрии перпендикулярной траектории частиц (второй канал).

В качестве временной системы используется ФЭУ-85, расположенный на верхней грани АВСС и “просматривающий” объем блока в направлении вертикальной оси симметрии. Центр фотокатода ФЭУ-85 расположен в углу верхней грани на ее диагонали в 31 мм от центра угла и 20 мм от каждой из сторон грани (рис. 2).

В качестве отражающей поверхности в АВСС использована белая бумага типа ватман.

Рис. 2. Схема амплитудно-временного сцинтилляционного спектрометра (АВСС)...

3. КАЛИБРОВКА АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННОГО СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО СПЕКТРОМЕТРА

Калибровка АВСС 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 [6]. Целью калибровки являлось определение энергетической зависимости и энергетического разрешения, а также временных характеристик АВСС от энергии электронного пучка.

Вторичный электронный пучок формировался с помощью медного конвертора диаметром $\varnothing 3.2$ мм и толщиной 1 мм. Электроны, выходящие из конвертора, отклонялись магнитным полем магнита СП-3 под углом 23° в свинцовый коллиматор К диаметром 15 мм и регистрировались сцинтилляционными счетчиками S_1 и S_2 размером $15 \times 15 \times 1$ мм³. Интенсивность электронного пучка составляла около $50 \text{ e}^-/\text{с}$ (рис. 2).

Блок-схема калибровки АВСС представлена на рис. 3.

Рис. 3. Блок-схема калибровки АВСС...

Сигналы с триггерных счетчиков S_1 и S_2 через формирователи Φ_1 , Φ_2 и задержки 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 блоков зарядочувствительного цифрового преобразователя (ЗЦП) и время-цифрового преобразователя (ВЦП). На входы *Анализ* блока ЗЦП через блоки задержек Z_4 и Z_5 подавались сигналы с ФЭУ-49. На вход *Stop* блока ВЦП через блок задержек Z_3 подавался сигнал от ФЭУ-85 временной системы АВСС, а через блок задержек Z_6 сигнал от счетчика S_3 размером $70 \times 70 \times 5$ мм³, который являлся счетчиком контроля потока электронов, выходящих из АВСС. Сигнал *Start* являлся также сигналом, с помощью которого через крейт-контролер (КК) системы САМАС производилась запись сигналов в память компьютера (ПК).

Калибровка АВСС на пучке электронов проходила в два этапа. На первом этапе последовательно на пучке электронов с энергией более 40 МэВ, при которой происходит максимальное энерговыделение ливней в объеме АВСС, были выравнены амплитуды сигналов обоих ФЭУ-49 таким образом, чтобы амплитудный спектр с каждого ФЭУ был расположен в рабочей области ЗЦП. Выравнивание амплитуд сигналов осуществлялось путем изменения величин напряжения на делителях напряжения обоих ФЭУ-49.

Суть процедуры первого этапа определена тем, что полное среднее энерговыделение электрона в объеме АВСС при прохождении пути, равного толщине спектрометра 20 см, составляет около $E \approx L \cdot dE/dx = 20 \cdot 2 \approx 40$ МэВ ($L = 20$ см – толщина АВСС, $dE/dx \approx 2$ МэВ/см – средняя величина ионизационных потерь электронов на единицу пути в пластиковом сцинтилляторе). Поэтому при увеличении энергии электронов более 40 МэВ увеличение

энерговыведения в АВСС не происходит и средний канал, определяющий среднее энерговыведение ливней в АВСС, не изменяется [4, 7].

4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННОГО СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО СПЕКТРОМЕТРА

На рис. 4а представлена зависимость средней величины суммы сигналов двух амплитудных каналов АВСС от тока магнита СП-3. Каждая точка на рисунке представляет среднюю величину амплитудного спектра $\langle A \rangle$ со среднеквадратичным отклонением $\sigma = \text{FWHM}/2.35$ (FWHM – ширина амплитудного спектра на половине максимума его высоты).

Рис. 4. Зависимость средней амплитуды суммы двух каналов АВСС (а) и средней энергии электронов(б), зарегистрированной АВСС, от тока магнита СП-3.

Характер зависимости аналогичен характеру зависимостей, полученных в работах [4, 7]. Начиная с тока магнита $I \approx 19$ А суммарная амплитуда не изменяется, что означает полное энерговыведение в объеме АВСС, соответствующее энергии электронов $E = 40$ МэВ. Этой энергии соответствует средняя суммарная амплитуда $\langle A \rangle = 1140$ канал. Таким образом, коэффициент пропорциональности $k = E/\langle A \rangle = 40/1140 = 0.0351$ МэВ/канал.

На рис. 4б представлена зависимость средней величины энергии, зарегистрированной АВСС от тока магнита СП-3. В диапазоне средних энергий примерно от 10 до 40 МэВ в пределах ошибок зависимость имеет линейный характер. При энергиях меньше примерно 10 МэВ зависимость имеет нелинейный характер. Эта область определяется значительным низкоэнергетическим (≤ 1 МэВ) фоном, связанным с взаимодействием фотонного пучка с воздухом при его транспортировке от последнего коллиматора до конвертора и после [6]. Данная область является нерабочей.

На рис. 5 представлена зависимость относительного энергетического разрешения спектрометра АВСС ($\delta = \text{FWHM}/\langle E \rangle/2.35 \cdot 100\%$) от величины зарегистрированной энергии электронного пучка за вычетом относительного энергетического разрешения электронного пучка [5]. Минимальное относительное энергетическое разрешение наблюдается при энергии электронов $E \approx 27$ МэВ и составляет $\delta \approx 5\%$, что на 2% лучше разрешения спектрометра аналогичной конструкции с использованием ФЭУ-52 и воздушными светосборниками из работы [4].

Рис. 5. Зависимость относительного энергетического разрешения спектрометра АВСС от средней энергии электронного пучка.

5. ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННОГО СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО СПЕКТРОМЕТРА

5.1. Зависимость положения среднего канала временного спектра амплитудно-временного сцинтилляционного спектрометра от энергии электронов

В настоящей работе исследована зависимость положения среднего канала временного спектра, определяемого временной системой АВСС. На рис. 6 представлены зависимости изменения положения среднего канала временного спектра $\langle A_T \rangle$ (а) и среднеквадратичного разрешения временного спектра ΔA_T (б) от энергии электронов.

Рис. 6. Зависимость среднего канала временного спектра АВСС (а) и среднеквадратичное разрешение временных спектров АВСС (б) от энергии электронов.

Характеры зависимостей на рис. 6 в целом соответствуют характеру зависимостей на рис. 5, однако их суть разная. Время формирования импульса спектрометром Δt складывается из времени формирования сцинтилляционного импульса света в сцинтилляторе $\Delta t_{\text{сц}}$ и времени формирования импульса ФЭУ $\Delta t_{\text{ФЭУ}}$ ($\Delta t = \Delta t_{\text{сц}} + \Delta t_{\text{ФЭУ}}$). В последнем случае время формирования импульса для одного типа ФЭУ практически постоянно, а время формирования импульса сцинтиллятором не постоянно. Оно складывается из времени высвечивания сцинтилляционного света сцинтиллятором $\Delta t_{\text{сц св}}$ [7] и времени сбора света $\Delta t_{\text{отраж}}$ ($\Delta t_{\text{сц}} = \Delta t_{\text{сц св}} + \Delta t_{\text{отраж}}$). $\Delta t_{\text{отраж}}$ является временем, затраченным на прохождение расстояния, определяемого суммарным числом отражений от внутренних граней сцинтилляционного блока световыми сцинтилляционными пучками, возникшими от взаимодействия со сцинтиллятором каждой вторичной заряженной частицей ливня при его развитии.

5.2. Влияние развития электромагнитного ливня на временные характеристики амплитудно-временного сцинтилляционного спектрометра

При прохождении электронов через, например, “тонкий” триггерный сцинтилляционный счетчик ($t_{\text{сч}} \leq 0.02X_0$) время формирования импульса при одних типах сцинтиллятора и ФЭУ будет определяться размерами счетчика, что очень важно при использовании счетчика во времяпролетном методе. В “тонких” счетчиках время формирования не зависит или слабо зависит от числа отражений или суммарной длины треков отраженного сцинтилляционного света, поскольку величина средней энергии частицы, выделяемой в объеме счетчика, практически постоянна. Тем более, что в “тонких” сцинтилляторах длина пути частицы определяется практически одной частицей, но в продолжительных или “толстых” сцинтилляторах ($t_{\text{сч}} > 0.02X_0$) развиваются электромагнитные ливни и число частиц увеличивается, время формирования импульса меняется. Увеличение числа вторичных заряженных частиц ведет к увеличению числа отражений световых сцинтилляционных пучков от внутренних граней детектора или к

увеличению общей длины пути и, соответственно, времени $\Delta t_{\text{отраж}}$, что приводит к увеличению времени формирования импульса Δt .

Во временных измерениях увеличение габаритов детектора и в первую очередь его толщины приводит к тому, что временная отметка *Stop* относительно отметки *Start* из-за увеличения времени на прохождение суммарной длины отражений внутри сцинтилляционного блока будет увеличиваться. Аналогичный эффект будет наблюдаться в случае постоянных габаритов “толстого” сцинтиллятора, но при увеличении энергии электронов, поскольку за счет более интенсивного развития ливней суммарная длина пути, проходимая световым пучком внутри сцинтиллятора, будет также увеличиваться и приводить к увеличению $\Delta t_{\text{отраж}}$.

Рисунок 6а показывает, что при увеличении энергии электронов временная отметка *Stop*, формируемая временной системой АВСС относительно отметки *Start*, которая в свою очередь формируется совпадениями сигналов триггерной системой S_1 и S_2 , уходит в сторону увеличения времени на прохождения расстояний между положениями триггерных счетчиков и АВСС. Расстояние при калибровке АВСС не менялось, следовательно, при увеличении энергии электронов увеличивается общая длина пути сцинтилляционного света от взаимодействия вторичных заряженных частиц ливня со сцинтиллятором, формируемая суммой отражений света от внутренних граней блока АВСС.

При энергии электронов $E_1 = 8$ МэВ величина среднего канала временного спектра $\langle A_T \rangle \sim 500$ каналов, а при $E_2 = 40$ МэВ имеем $\langle A_T \rangle \sim 580$ каналов (рис.6). При цене канала ЗЦП, равного 90 пс/канал, определенного ранее специальными временными измерениями, задержка в формировании импульса составила $t_{E_2} - t_{E_1} = 90 \cdot (580 - 500) = 7200$ пс, что равно прохождению сцинтилляционным светом суммарного расстояния (с учетом скорости прохождения света в сцинтилляторе из полистерола, равной примерно 5000 пс/м) около 1.5 м.

При энергии электронов $E \geq 40$ МэВ дополнительное энергосодержание в объеме спектрометра не происходит [4, 8], увеличение длины пути за счет увеличения числа отражений не происходит и средний канал временного спектра не меняется, для электронов этих энергий спектрометр становится “тонким”.

На рис. 6б представлена зависимость временного разрешения АВСС от энергии электронов. Минимальное разрешение наблюдается при энергии электронов около 15 МэВ и составляет примерно 70 каналов или $90 \cdot 70 = 6300$ пс.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты калибровки двухканального амплитудно-временного сцинтилляционного спектрометра на пучке вторичных электронов ускорителя “Пахра” на базе магнита СП-3 показали, что в области энергий электронов примерно от 10 до 35 МэВ зависимость регистрируемой энергии от тока СП-3 имеет линейный характер и относительное энергетическое разрешение спектрометра составляет менее 10%. При энергии электронов $E \approx 30$ МэВ относительное энергетическое разрешения минимально и составляет около 5%. Обнаружено, что в диапазоне энергий электронов $E < 40$ МэВ наблюдается нелинейная зависимость среднего канала временного спектра от энергии электронов, при $E \geq 40$ МэВ величина среднего канала временного спектра от энергии не зависит.

7. ЗАМЕЧАНИЯ

Погрешности значений относительного энергетического и временного разрешений на рис. 5 и 6б определялись процедурой подгонки энергетических и временных спектров полиномом стандартной программы OriginPro 9.0 и составили 15–20% от значений величин, представленных на рисунках. Чтобы не перегружать рис. 6а, среднеквадратичные ошибки величин средних значений временных спектров не представлены, поскольку имеют значительные величины, примерно от 70 до 140 каналов, и линия, описывающая экспериментальные результаты, проведена для наглядности.

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. Алексеев В.И., Басков В.А., Варфоломеева Е.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Кречетов Ю.Ф., Полянский В.В., Сидорин С.С. // Краткие сообщения по физике, ФИАН. 2023. № 8. С. 49. <https://doi.org/10.3103/S1068335623080031>
3. Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Кречетов Ю.Ф., Полянский В.В., Сидорин С.С. // ПТЭ. 2021. № 1. С. 40. <https://doi.org/10.31857/S003281622101002X>
4. Алексеев В.И., Басков В.А., Варфоломеева Е.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Кречетов Ю.Ф., Полянский В.В., Сидорин С.С. // ПТЭ. 2022. № 4. С. 36. <https://doi.org/10.31857/S0032816224030017>.
5. Ахмад С.М., Алексеев В.И., Басков В.А., Варфоломеева Л.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Кречетов Ю.Ф., Полянский В.В., Сидорин С.С. // Краткие сообщения по физике, ФИАН. 2025. № 3. С. 19.

6. *Алексеев В.И., Архангельский А.И., Басков В.А., Батищев А.Г., Власик К.Ф., Гальпер А.М., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Полянский В.В., Сидорин С.С., Утешев З.М.* // ПТЭ. 2023. № 6. С.59. <https://doi.org/10.31857/S0032816223040109>
7. *Медведев М.Н.* Сцинтилляционные детекторы. Москва: Атомиздат, 1977.
8. *Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Кречетов Ю.Ф., Полянский В.В.* // ПТЭ. 2020. № 5. С. 10. <https://doi.org/10.31857/S0032816220050079>.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схема экспериментальной установки по поиску “тяжелого лептона” на ускорителе ФИАН “Пахра”: Т – медная мишень, $S_1 - S_3$ – сцинтилляционные счетчики, Γ_1 и Γ_2 – сцинтилляционные фотодетекторы, М – постоянный магнит, CC_1 и CC_2 – сцинтилляционные спектрометры.
- Рис. 2.** Схема АВСС на пучке вторичных квазимонохроматических электронов ускорителя “Пахра” ФИАН (светонепроницаемые корпуса на ФЭУ-49 не показаны): 1 – сцинтилляционный блок, 2 – ФЭУ-49, 3 – ватман, 4 – черная бумага, 5 – делители напряжения ФЭУ-49 и ФЭУ-85, 6 – ФЭУ-85.
- Рис. 3.** Блок-схема калибровки АВСС: К – коллиматор, S_1 и S_2 – триггерные сцинтилляционные счетчики, S_3 – сцинтилляционный счетчик контроля доли энергии электромагнитного ливня, выходящего из АВСС, $\Phi_1 - \Phi_3$ и Φ_6 – блоки формирователей, $Z_1 - Z_6$ – блоки задержек, СС – схема совпадений, ЗЦП – зарядочувствительный цифровой преобразователь, ВЦП – время-цифровой преобразователь, *Start* – сигнал запуска блоков ЗЦП и ВЦП, *Stop* – временные сигналы со счетчиков S_3 и S_6 , *Анализ* – амплитудные сигналы с каналов АВСС, КК – крейт-контроллер системы САМАС, ПК – персональный компьютер.
- Рис. 4.** Зависимость средней амплитуды суммы двух каналов АВСС (**а**) и средней энергии электронов (**б**), зарегистрированной АВСС, от тока магнита СП-3.
- Рис. 5.** Зависимость относительного энергетического разрешения спектрометра АВСС от средней энергии электронного пучка.
- Рис. 6.** Зависимость среднего канала временного спектра АВСС (**а**) и среднеквадратичное разрешение временных спектров АВСС (**б**) от энергии электронов.

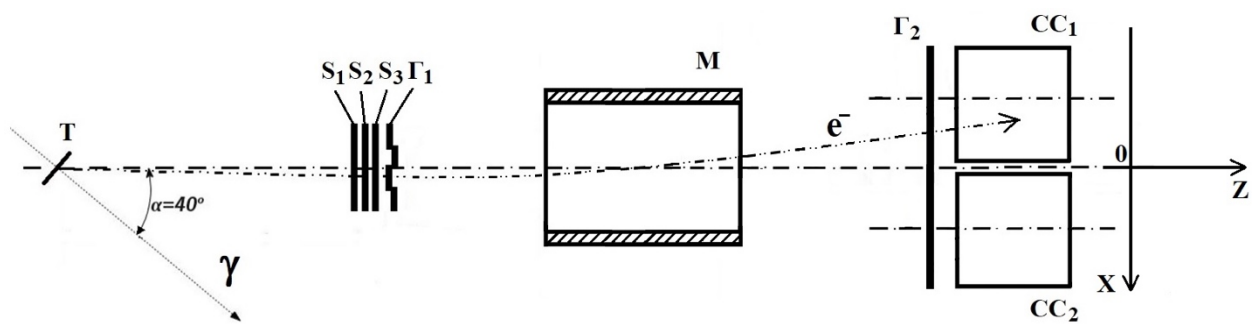


Рис. 1.

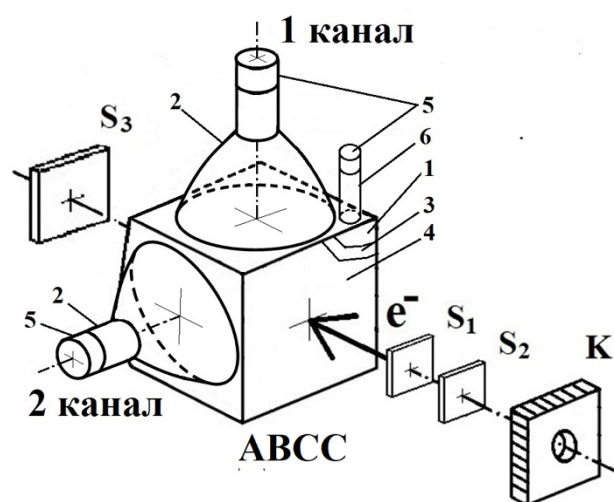


Рис. 2.

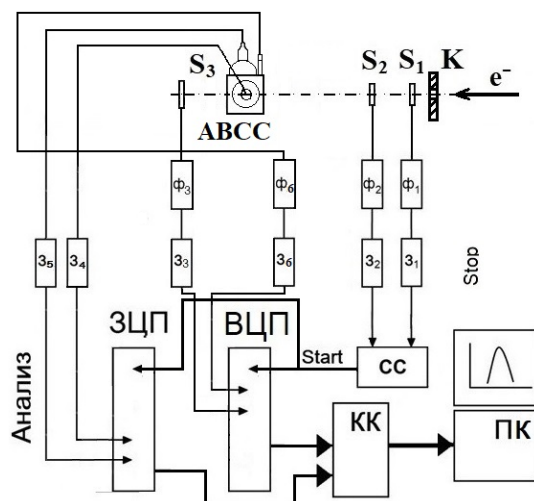
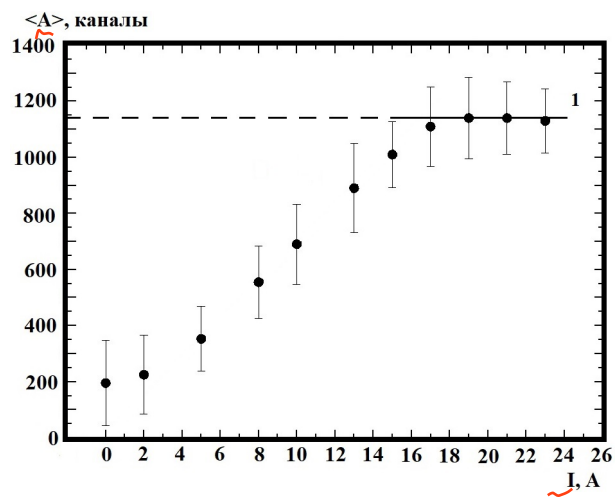
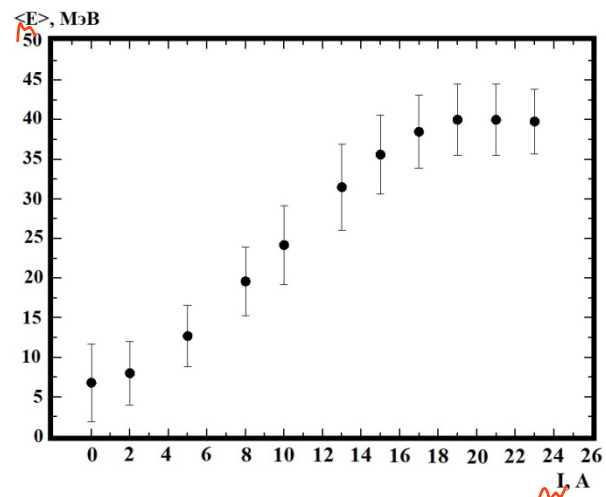


Рис. 3.



(a)



(б)

Рис. 4.

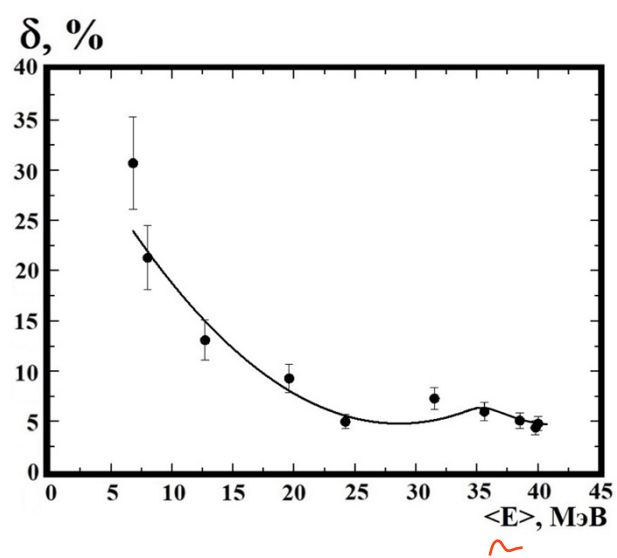


Рис. 5.

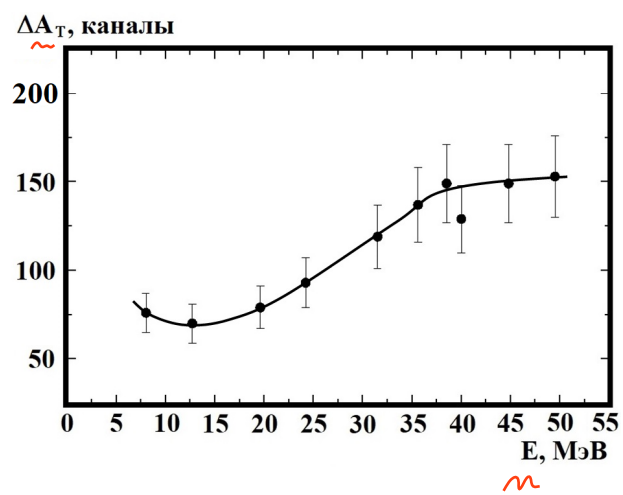
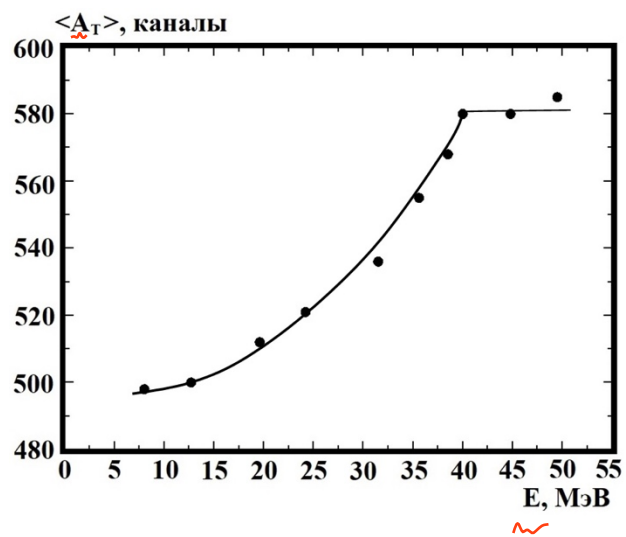


Рис. 6.