

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.08

ВОДНЫЙ ЧЕРЕНКОВСКИЙ 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, В. В. Полянский^a, С. С. Сидорин^a

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

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

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

Поступила в редакцию 26.06.2025 г.

После доработки 20.08.2025 г.

Принята к публикации 28.08.2025 г.

Представлены результаты калибровки на пучке вторичных электронов ускорителя “Пахра” Физического института им. П.Н. Лебедева РАН водного черенковского спектрометра толщиной $0.5X_0$, включающего амплитудную и временную системы регистрации на основе фотоэлектронных умножителей ФЭУ-85. Определено, что в области энергий электронов 10–30 МэВ относительное энергетическое разрешение невелико, при энергии электронов $E \approx 25$ МэВ оно минимально и составляет около 50%. Определены три области изменения временного спектра среднего канала от энергии электронов: при $0 < E < 13$ МэВ зависимость пропорциональная, при $13 < E < 45$ МэВ зависимость нелинейная, при $E \geq 45$ МэВ величина временного спектра среднего канала от энергии не зависит.

1. ВВЕДЕНИЕ

Представлены результаты калибровки на вторичном квазимонохроматическом пучке электронов ускорителя С-25Р “Пахра” Физического института им. П.Н. Лебедева РАН водного черенковского спектрометра (ВЧС), являющегося одним из вариантов спектрометра, предназначенного для работы в установке по поиску ранее не наблюдавшихся, относительно легких долгоживущих заряженных частиц ℓ^\pm с массой, меньшей массы электрона, но большей массы мюона или “аномальных лептонов” [1]. Диапазон энергий частиц, вылетающих из мишени и сепарируемых магнитом установки, составляет 10–50 МэВ [2]. Модельные расчеты показали, что для надежного выделения энергетического пика “аномальных лептонов” точность определения энергии регистрируемых сцинтилляционных спектрометров частиц должна составлять менее 10%.

2. КОНСТРУКЦИЯ ВОДНОГО ЧЕРЕНКОВСКОГО СПЕКТРОМЕТРА

Водный черенковский спектрометр (рис. 1) является емкостью в виде усеченного конуса из пластмассы с толщиной стенки 0.5 мм и длиной 180 мм. Диаметр входной малой грани конуса с крышкой заливной горловины из пластмассы толщиной 1 мм составляет 70 мм, диаметр задней большой грани конуса равен 90 мм. Через заливную горловину в емкость залита дистиллированная вода, являющаяся рабочим радиатором черенковского спектрометра. Регистрация световых вспышек черенковского излучения, возникающих от взаимодействия заряженных частиц с радиатором, осуществляется с помощью двух фотоэлектронных умножителей ФЭУ-85 со стандартными делителями напряжения, расположенными с внешней стороны емкости на большой грани. Один ФЭУ является амплитудной частью спектрометра (А), а второй – временной (Т).

Рис. 1. Конструкция и схема калибровки водного черенковского спектрометра

3. КАЛИБРОВКА ВОДНОГО ЧЕРЕНКОВСКОГО СПЕКТРОМЕТРА

Калибровка ВЧС 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 (рис. 1) [2, 3]. Целью калибровки являлось исследование энергетических и временных характеристик ВЧС в зависимости от энергии электронов.

Вторичный электронный пучок формировался с помощью медного конвертора диаметром 3.2 мм и толщиной 1 мм. Электроны, выходящие из конвертора, отклонялись магнитным полем магнита СП-3 под углом 30° в свинцовый коллиматор К диаметром 15 мм и регистрировались сцинтилляционными счетчиками S_1 и S_2 размером 15×15×1 мм³ (рис 1). Интенсивность электронного пучка составляла около 50 $e^-/с$.

Блок-схема калибровки ВЧС представлена на рис. 2.

Рис. 2. Блок-схема калибровки ВЧС:

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 СС длительностью 100 нс являлся триггерным сигналом *Start* для запуска блоков зарядочувствительного цифрового преобразователя (ЗЦП) и время-цифрового преобразователя (ВЦП). На вход *Анализ* блока ЗЦП через задержку Z_3 подавался сигнал амплитудного канала (А) ВЧС. На вход *Stop* блока ВЦП через задержки Z_3 , Z_4 и Z_5 подавались сигналы от счетчиков S_3 , S_4 и S_5 .

Счетчик S_3 размером $30 \times 30 \times 5$ мм³ располагался непосредственно перед ВЧС и являлся дополнительным триггерным счетчиком, сигнал от которого не входил в формирование триггера, но записывался в общий объем данных для последующей обработки. Расстояние между системой триггерных счетчиков S_1 , S_2 и счетчиком S_3 составляло 200 см. Счетчик S_4 являлся счетчиком контроля потока электронов, выходящих из ВЧС. Сигнал *Start* являлся также сигналом, с помощью которого через крейт-контролер (КК) системы САМАС проводилась “запись” сигналов в память компьютера (ПК).

4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ

На рис. 3 представлены зависимости средней энергии электронного пучка, регистрируемые водным черенковским спектрометром 1 и амплитудно-временным сцинтилляционным спектрометром (АВСС) 2 [2], от тока магнита СП-3. В диапазоне токов магнита примерно от 5 до 18 А зависимости 1 и 2 имеют линейный характер. Однако при одинаковой толщине спектрометров равной $0.5X_0$, начиная с токов примерно 18 и 30 А, значения энерговыделений в обоих спектрометрах при дальнейших увеличениях тока в обмотках магнита СП-3 не изменяются и численно равны $\Delta E_{\text{АВСС}} = 40 \pm 4$ МэВ и $\Delta E_{\text{ВЧС}} = 48.6 \pm 6.5$ МэВ соответственно. Отношение энерговыделений составляет $\Delta E_{\text{ВЧС}}/\Delta E_{\text{АВСС}} \approx 1.2 \pm 0.3$, что близко к обратному отношению радиационных длин воды ($X_0^{\text{вода}} = 36$ см) и пластического сцинтиллятора ($X_0^{\text{сцинт}} = 40$ см) $X_0^{\text{сцинт}}/X_0^{\text{вода}} = 1.11$ [4]. Близость значений отношений $\Delta E_{\text{ВЧС}}/\Delta E_{\text{АВСС}}$ и $X_0^{\text{сцинт}}/X_0^{\text{вода}}$ означает, что, несмотря на разный тип взаимодействия электронов с веществом, энерговыделение на единицу длины в рабочем веществе спектрометра определяется значением X_0 (при меньшем значении X_0 величина энерговыделения на единицу длины больше, чем в случае большего значения X_0), что подтверждается экспериментальной практикой.

Рис. 3. Зависимости средней энергии электронов, зарегистрированной водным черенковским спектрометром (1) и амплитудно-временным сцинтилляционным спектрометром (2), от тока магнита СП-3.

Зависимость относительного энергетического разрешения ВЧС от энергии электронов представлена на рис. 4. Минимальное относительное энергетическое разрешение ВЧС составило $\delta_{\text{ВЧС}} \approx 50\%$ при энергии электронов $E \approx 23$ МэВ (кривая 1). Оно существенно хуже относительного энергетического разрешения АВСС в этой же области энергий, $\delta_{\text{АВСС}} \sim 10\%$ (кривая 2) [2]. Это связано с недостаточным количеством света, формируемого черенковским излучением в радиаторе, и методом его сбора по сравнению с формированием сцинтилляционного излучения. Кроме того, для сбора света в ВЧС используется один ФЭУ-

85 с диаметром фотокатода 25 мм, а в АВСС используются два ФЭУ-49 с диаметром фотокатода 160 мм.

Рис. 4. Зависимость относительного энергетического разрешения водного черенковского спектрометра (I) и амплитудно-временного сцинтилляционного спектрометра

5. ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

5.1. Временные спектры

При калибровке ВЧС на электронном пучке исследованы временные характеристики. На рис. 5 представлены временные спектры ВЧС, полученные при регистрации электронов с энергиями от 13.0 до 48.6 МэВ. Видно существенное изменение спектров в указанном диапазоне энергий. Наблюдаются два эффекта, а именно: сдвиг среднего канала временного спектра примерно с 410 канала (рис. 5а) до примерно 465 канала (рис. 5д) и появление второго пика (рис. 5б, 5в и 5г).

Эффект сдвига среднего канала временного спектра с увеличением энергии электронов связан с началом развития электромагнитных ливней в радиаторе ВЧС и, соответственно, с увеличением числа вторичных частиц, которое приводит к увеличению общей длины пути черенковского света при отражениях от внутренних граней емкости, в которой находится радиатор [2, 5, 6].

Можно предположить, что появление второго пика объясняется тем, что в процессе высвечивания черенковского излучения в радиаторе ФЭУ регистрирует прямой свет, идущий непосредственно от излучающих атомов радиатора частиц, и отраженный за счет внутреннего отражения от стенок или граней емкости, приходящий с задержкой относительно времени взаимодействия электрона с радиатором.

Рис. 5. Временные спектры водного черенковского спектрометра (а–д), и амплитудно-временного сцинтилляционного спектрометра (е).

На рис. 5а виден один временной пик с величиной среднего канала примерно 410. При увеличении энергии значение среднего канала сдвинулось в сторону больших каналов и достигло величины примерно 440 ($E = 24.5$ МэВ) (рис. 5б). Видно, что на этом же рисунке появился второй пик с величиной среднего канала около 530. Это означает, что начал развиваться электромагнитный ливень с рождением вторичных частиц, которые далее могут двигаться под некоторыми углами относительно первоначальной траектории электронов и приводить к появлению эффекта отражений. В случае, приведенным на рис. 5а, эффект отражения тоже присутствует, но по отношению к величине регистрации прямого света он существенно меньше.

При токах магнита СП-3 $I > 30$ А (рис. 3) среднее энерговыделение ливня в объеме ВЧС составляет $\Delta E_{\text{ВЧС}} = 48.6 \pm 6.5$ МэВ и наблюдается снова один временной пик (рис. 5д), определяемый отраженным черенковским светом.

5.2. Изменения временных спектров средних каналов от энергии электронов

Зависимости временных спектров средних каналов прямого и отраженного черенковского света от энергии электронов представлены на рис. 6 (ошибки значений на графиках, составляющие примерно 100 каналов, не показаны, чтобы не перегружать графики). Поведение зависимостей сложное, и можно выделить три области (отмеченные римскими цифрами) (рис. 6а). Область I является экстраполяцией изменения временных спектров средних каналов от энергии электронов в диапазоне от 0–13.0 МэВ. Области II и III представляют значения временных спектров ВЧС средних каналов при энергиях от 13.0 до 48.6 МэВ. В более крупном масштабе зависимости изменения временных спектров прямого и отраженного света для средних каналов от энергии электронов областей II и III представлены на рис. 6б.

Данные зависимости по характеру соответствуют зависимости изменения временных спектров средних каналов от энергии электронов, представленной в [2, 5] (рис. 6г) и полученной при исследовании временных характеристик АВСС. Каждая точка зависимости рис. 6г являлась средним каналом соответствующего временного спектра АВСС, который определялся по всему спектру. В работах [2, 5] не представлены временные спектры, но для примера типичный спектр, определенный временной системой АВСС, а в качестве дополнительного материала показан на рис. 5е.

Рис. 6. Зависимости изменения средних значений $\langle A_T \rangle$ для временных каналов от энергии электронов E для ВЧС...

Спектр по характеру аналогичен рис. 5а–д, т. е. включает в себя эффект прямого и отраженного света. Для того чтобы подчеркнуть одинаковый характер зависимостей средних значений от энергии электронов для временных каналов ВЧС и АВСС, на рис 6в представлена экстраполяция изменения временных спектров АВСС для средних каналов в диапазоне энергий электронов от нуля до 6.8 МэВ ($E = 6.8$ МэВ – первая точка измеренной АВСС-зависимости энергии электронов от тока магнита СП-3).

Можно предположить, что характер области I на рис. 6а и 6в определяется взаимодействием одиночного электрона с веществом радиатора ВЧС и сцинтилляционного блока АВСС, выражающегося только в увеличении длины трека при увеличении энергии электрона, на котором формируется черенковское излучение и ионизация соответственно.

В области энергий $E_0 \text{ ВЧС} \approx 15 \text{ МэВ}$ (рис. 6а) и $E_0 \text{ АВСС} \approx 8 \text{ МэВ}$ (рис.6в) происходит резкое изменение характера зависимостей временных спектров средних каналов от энергии электронов. В работе [5] сделано предположение, что характер зависимостей на рисунках в области II определяется процессом развития электромагнитных ливней при взаимодействии электронов с рабочим веществом спектрометра.

Характеры зависимостей на рис. 6б и 6г фактически определяют профиль развития электромагнитного ливня в терминах временной задержки от его начала, определяемого энергиями $E_{0\text{ВЧС}}$ и $E_{0\text{АВСС}}$, до момента, при котором среднее энерговыделение электромагнитного ливня полностью “укладывается” в объеме спектрометров ($\langle \Delta E_{\text{ВЧС}} \rangle \approx 48.6 \text{ МэВ}$, $\langle \Delta E_{\text{АВСС}} \rangle \approx 40 \text{ МэВ}$).

В области III при увеличении энергии электронов энерговыделение в объеме спектрометров не увеличивается, длины треков вторичных частиц и временная задержка не увеличиваются. При энергии электронов E , большей $\langle \Delta E_{\text{ВЧС}} \rangle$ и $\langle \Delta E_{\text{АВСС}} \rangle$, черенковский и сцинтилляционный спектрометры, соответственно, будут являться “тонкими” [5].

На рис. 7 представлена зависимость среднеквадратичного временного разрешения ВЧС от энергии электронов для прямого (1) и отраженного (2) черенковского света. Минимальное временное разрешение для отраженного света примерно на 25% лучше прямого, в обоих случаях минимальные величины разрешений находятся в диапазоне энергий электронов примерно от 20 до 30 МэВ. В этом же диапазоне регистрируется лучшее энергетическое разрешение ВЧС (рис. 4).

Рис. 7. Зависимость среднеквадратичного разрешения для временных спектров ВЧС от энергии электронов: 1 – прямой свет, 2 – отраженный.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты калибровки водного черенковского спектрометра на пучке вторичных электронов ускорителя “Пахра” ФИАН на базе магнита СП-3 показали, что в области энергий электронов примерно от 5 до 20 МэВ зависимость регистрируемой энергии от тока СП-3 имеет линейный характер. Обнаружено, что в области исследованных энергий электронов от примерно 13 МэВ до 30 МэВ относительное энергетическое разрешение ВЧС невысокое. При энергии электронов $E \approx 25 \text{ МэВ}$ относительное энергетическое разрешения минимальное и составляет около 50%. Обнаружено, что характер временных спектров в диапазоне исследованных энергий меняется. При энергиях электронов $E \approx 13 \text{ МэВ}$ наблюдается один временной пик, соответствующий прямому черенковскому свету, идущему непосредственно от излучающих частиц. В диапазоне энергий электронов приметно от 13 до 45 МэВ наблюдаются два пика – прямой и отраженный. При энергиях электронов более примерно 45

МэВ снова наблюдается один пик, соответствующий только отраженному свету. Наблюдается сложная зависимость временного спектра среднего канала от энергии электронов, которую можно условно разделить на три области. В области I при энергиях электронов в диапазоне 0–13 МэВ наблюдается линейная или близко к ней зависимость. В области II при энергиях электронов примерно от 13 до 45 МэВ наблюдается нелинейная зависимость и в области III при энергиях электронов более примерно 45 МэВ снова наблюдается линейная зависимость, при которой величина временного спектра среднего канала от энергии не зависит.

7. ЗАМЕЧАНИЯ

Погрешности значений относительного энергетического и временного разрешений на рис. 4, 6 определялись процедурой подгонки энергетических и временных спектров полиномом стандартной программы OriginPro 9.0 и составили 15–20% от значений величин, представленных на рисунках. Линии, описывающие экспериментальные результаты на рис. 3, 4, 6, 7 проведены 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. *Ахмад С.М., Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Кречетов Ю.Ф., Полянский В.В., Сидорин С.С., Хафизова Е.А.* // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2025. № 3. С.19. <https://doi.org/10.3103/S1068335624602292>
3. *Алексеев В.И., Архангельский А.И., Басков В.А. и др.* // ПТЭ. 2023. № 6. С. 59. <https://doi.org/10.31857/S0032816223040109> .
4. *Группен К.* Детекторы элементарных частиц. Новосибирск: Сибирский хронограф, 1999.
5. *Ахмад С.М., Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Кречетов Ю.Ф., Полянский В.В., Сидорин С.С., Хафизова Е.А.* // ПТЭ. 2025. № 5.
6. *Огрзевальский З., Стругальский З.С.* Экспериментальное исследование процесса развития электронно-фотонных ливней при энергиях от 20 до 300 МэВ. Препринт ОИЯИ, ЛВЭ Р1-4562, Дубна, 1969.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Конструкция и схема калибровки водного черенковского спектрометра на пучке вторичных квазимонохроматических электронов ускорителя “Пахра” ФИАН: К – свинцовый коллиматор; S_1 – S_4 – сцинтилляционные счетчики; ВЧС – емкость с водным радиатором; А и Т – ФЭУ-85 с делителями напряжений.
- Рис. 2.** Блок-схема калибровки ВЧС: К – коллиматор; S_1 – S_3 – триггерные сцинтилляционные счетчики; S_4 – сцинтилляционный счетчик контроля доли энергии электромагнитного ливня, выходящего из ВЧС; ВЧС – водный черенковский спектрометр; Φ_1 – Φ_4 и $\Phi Т$ – блоки формирователей; Z_1 – Z_4 и $Z А$ – 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 , S_4 и ST ; *Анализ* – амплитудный сигнал с канал А ВЧС; КК – крейт-контроллер системы САМАС; ПС – персональный компьютер.
- Рис. 3.** Зависимости средней энергии электронов, зарегистрированной водным черенковским спектрометром (кривая 1) и амплитудно-временным сцинтилляционным спектрометром (кривая 2), от тока магнита СП-3.
- Рис. 4.** Зависимость относительного энергетического разрешения водного черенковского спектрометра (кривая 1) и амплитудно-временного сцинтилляционного спектрометра (кривая 2) от энергии электронов.
- Рис. 5.** Временные спектры водного черенковского спектрометра (а–д), и амплитудно-временного сцинтилляционного спектрометра (е); N_0 – полное число событий в спектре, E – энергия электронов.
- Рис. 6.** Зависимости изменения средних значений $\langle A_T \rangle$ для временных каналов от энергии электронов E для ВЧС (а, б; 1 – прямой свет, 2 – отраженный) и АВСС (в, г) в увеличенном масштабе.
- Рис. 7.** Зависимость среднеквадратичного разрешения для временных спектров ВЧС от энергии электронов: 1 – прямой свет, 2 – отраженный.

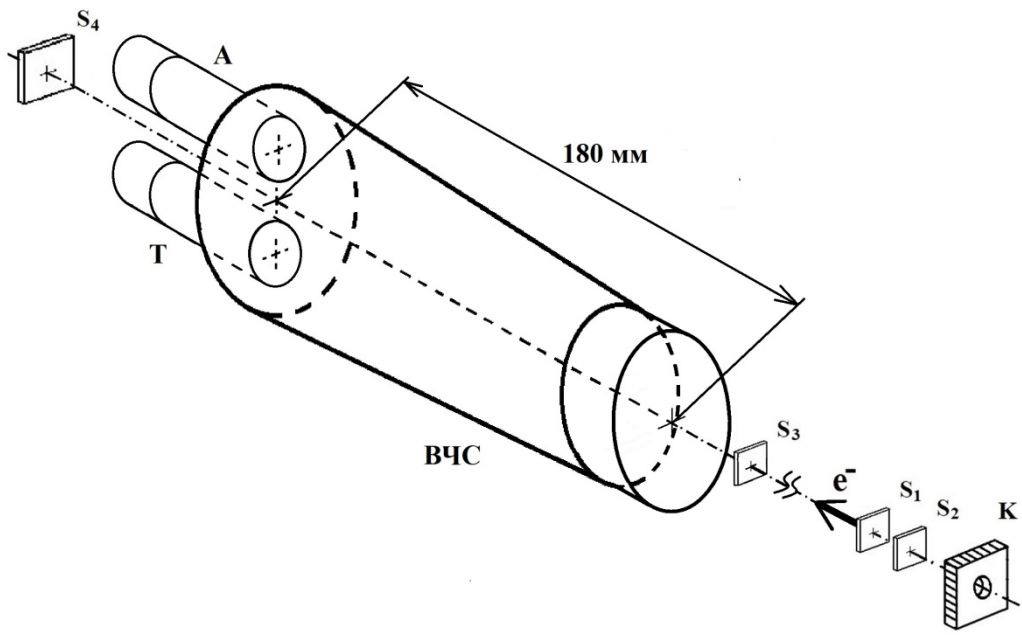


Рис. 1.

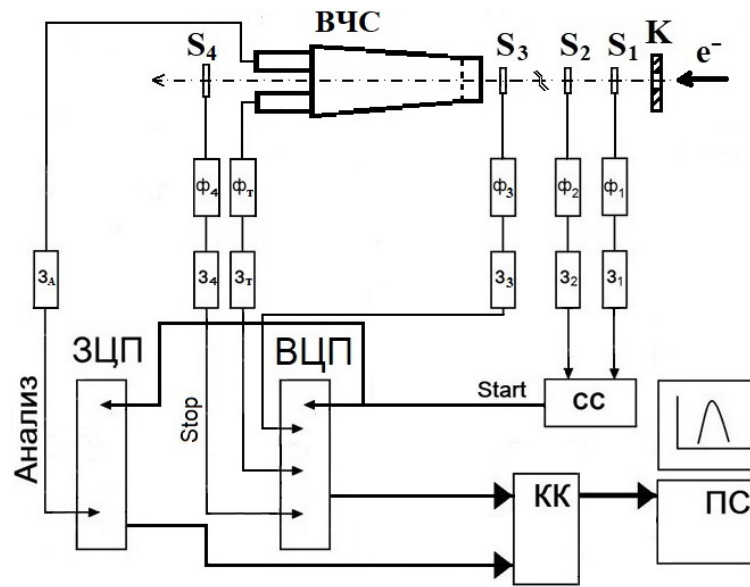


Рис. 2.

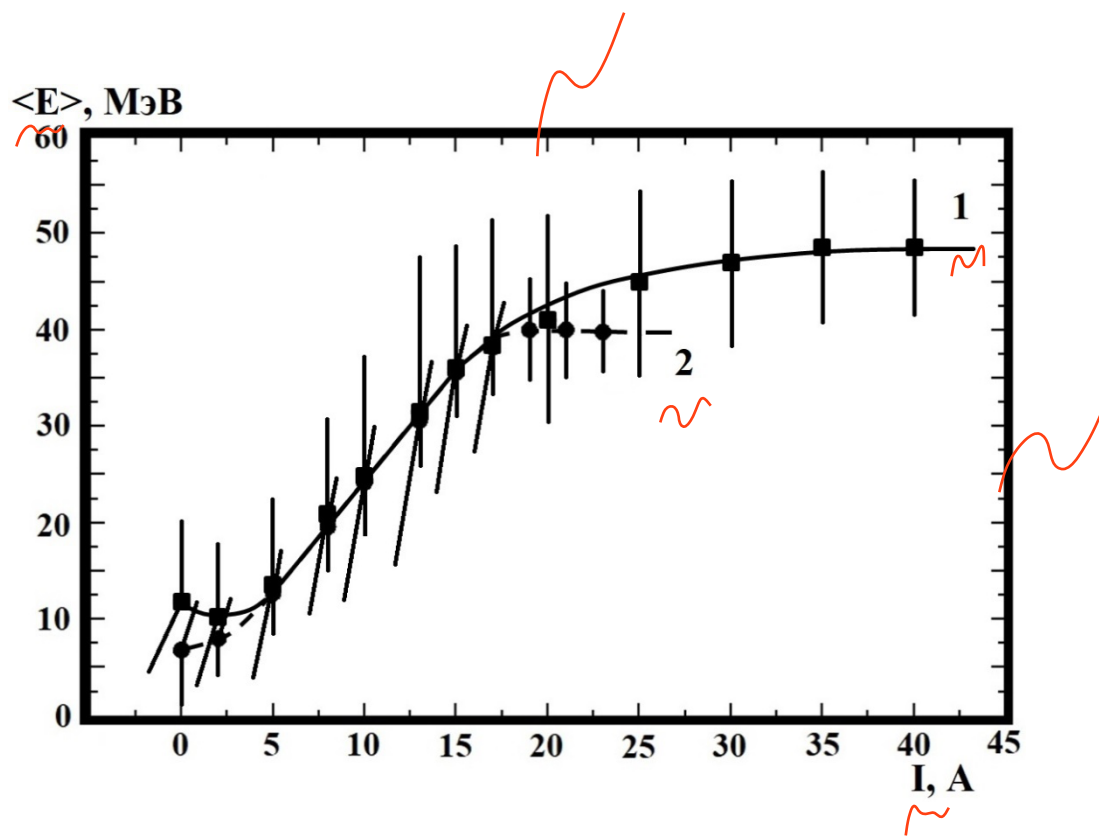


Рис. 3.

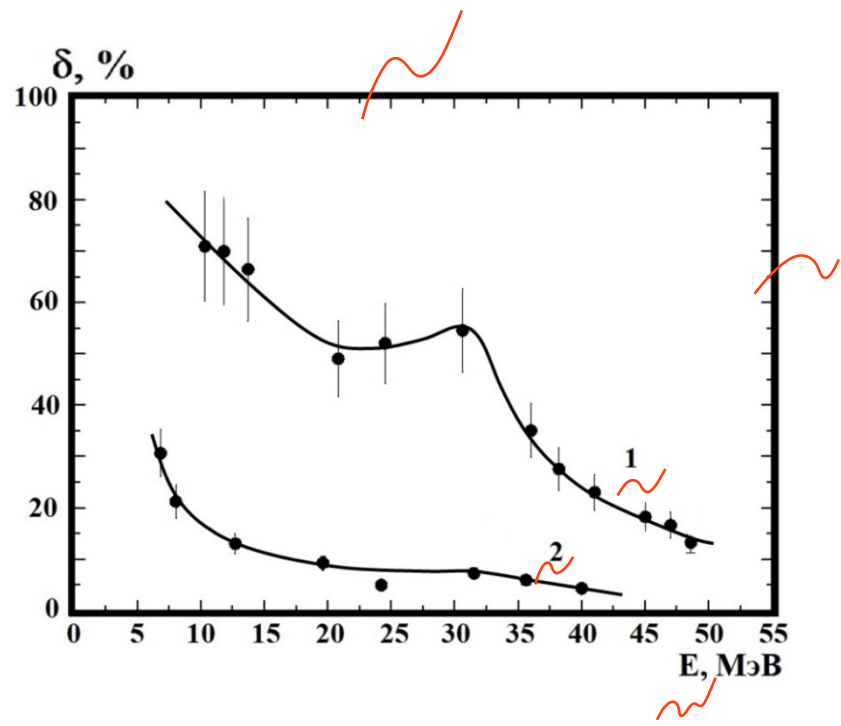


Рис. 4.

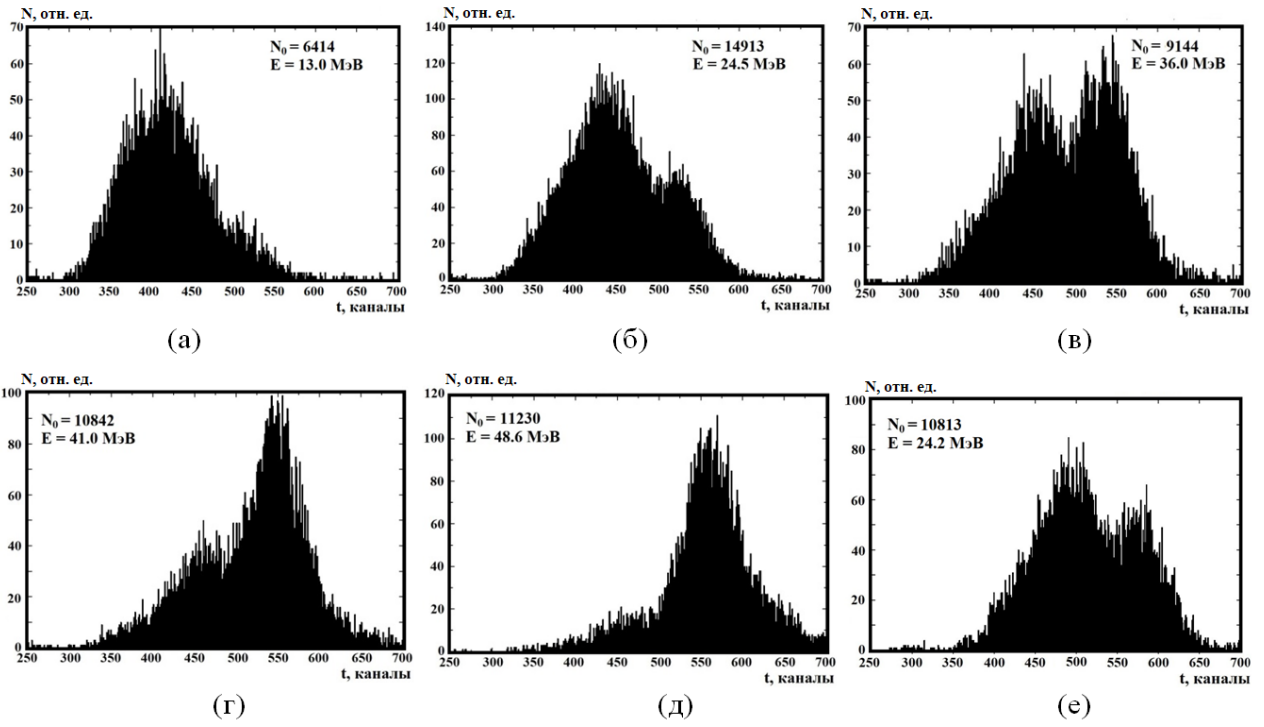
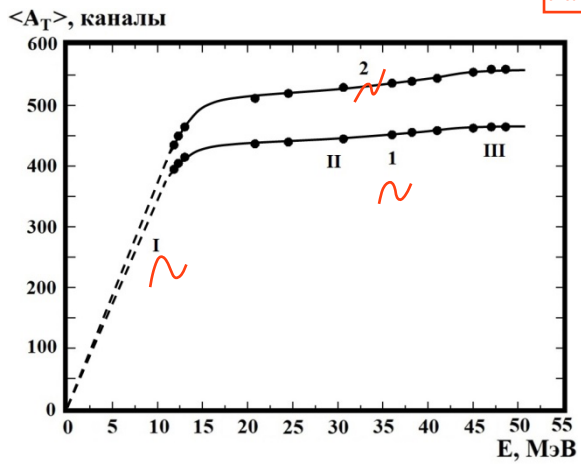
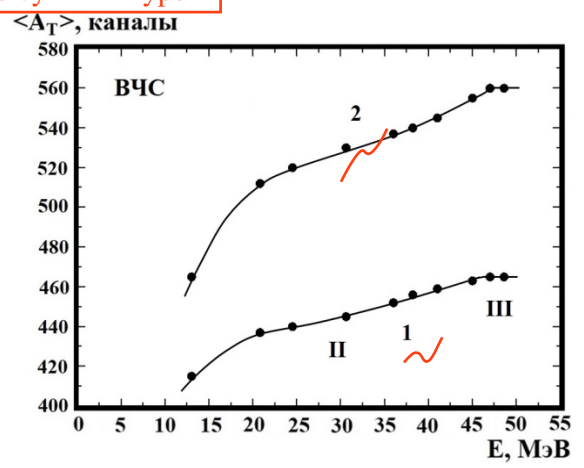


Рис. 5.

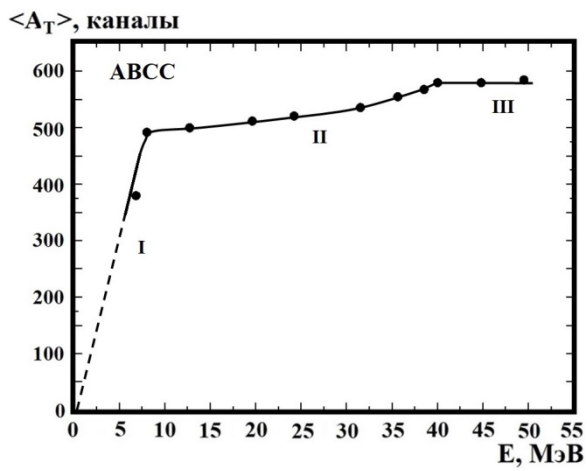
латинские буквы – курсив



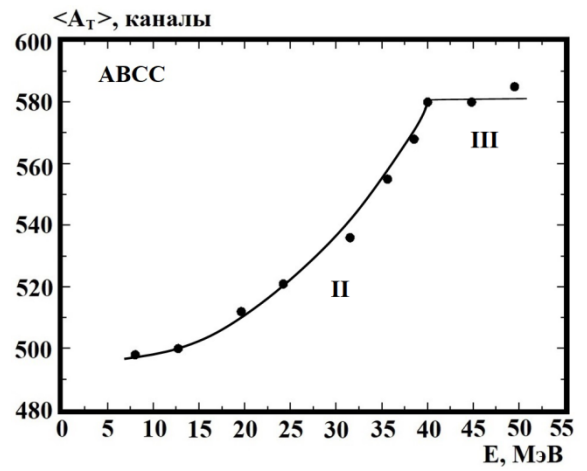
(a)



(б)



(в)



(г)

Рис. 6.

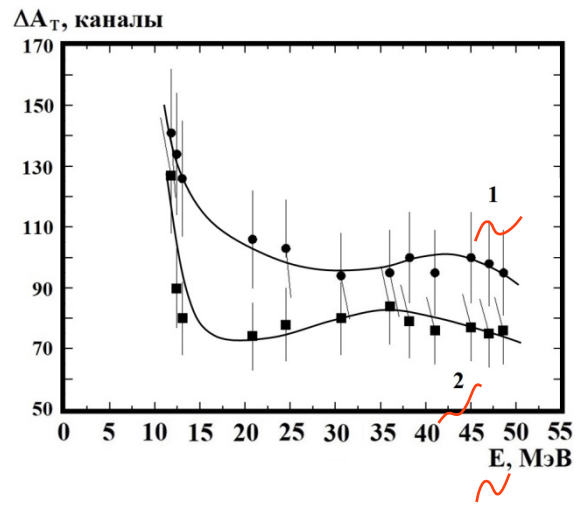


Рис. 7.