ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.08

КАЛИБРОВКА МНОГОКАНАЛЬНЫХ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО И ЧЕРЕНКОВСКОГО СПЕКТРОМЕТРОВ С ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

©2027 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 имени П.Н. Лебедева Российской академии наук*

Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

[b]*Московский педагогический государственный университет*

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

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

Поступила в редакцию 14.08.2026

После доработки 14.10.2026

Принята к публикации 26.10.2026

Представлены результаты калибровки с помощью мюонов космического излучения многоканального амплитудно-временного сцинтилляционного и многоканального водного черенковского спектрометров, включающих амплитудную и временную системы регистрации на основе фотоэлектронных умножителей ФЭУ-49, ФЭУ-85 и ФЭУ-143. Определено, что при регистрации мюонов относительные энергетические разрешения сцинтилляционного и черенковского спектрометров составили примерно 13% и 31%, временные разрешения – примерно 2.6 нс и 2.3 нс, координатные разрешения – примерно 1.8 см и 1.2 см соответственно.
Ключевые слова: сцинтилляционный спектрометр, черенковский спектрометр, космические мюоны, временной сдвиг, энергетическое разрешение, временное разрешение

1. ВВЕДЕНИЕ

На ускорителе С-25Р “Пахра” Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук в Троицке продолжается эксперимент по поиску заряженных частиц $\ell^{\pm}$ с массой, заключенной между массой электрона и мюона или “тяжелых лептонов” (“аномальных лептонов”) [1–3]. Оценочные расчеты [2] показали, что если заряженные частицы $\ell^{\pm}$ с массой, советующей этому диапазону, образуются в результате конверсии фотонов по механизму Бете–Гайтлера, то вероятность их взаимодействия с рабочим веществом детектора выше, чем в случае электронов (позитронов). Это означает, что длина

пробега “тяжелых лептонов” будет меньше длины пробега электронов в рабочем веществе детектора, что, в свою очередь, дает возможность эффективного разделения “тяжелых лептонов” и электронов (позитронов) в области энергий в десятки МэВ, т. е. можно будет использовать времяпролетный метод с применением в качестве счетчика *Stop* детектора большого объема [3–6].

Поэтому продолжается работа по усовершенствованию временных систем сцинтилляционного и черенковского спектрометров больших объемов, предназначенных для регистрации продуктов взаимодействия фотонов с мишенью [2–4]. Для определения амплитудных и временных характеристик спектрометров последовательно были выполнены калибровки спектрометров на минимально ионизирующих частицах космического излучения – мюонах.

2. МНОГОКАНАЛЬНЫЙ АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННОЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР

2.1. Конструкция многоканального амплитудно-временного сцинтилляционногоспектрометра

Временная система амплитудно-временного сцинтилляционного спектрометра (АВСС) [3], который в настоящее время используется в установке по поиску “тяжелых лептонов”, для увеличения точности была модернизирована добавлением двух фотоэлектронных умножителей ФЭУ-143, регистрирующих свет от взаимодействия частицы со сцинтилляционным блоком (рис. 1). Таким образом, АВСС получил новое название – многоканальный амплитудно-временной сцинтилляционный спектрометр (МАВСС).

Основой МАВСС является сцинтилляционный блок размером 200×200×200 мм^3 (рис. 1), который имеет амплитудную систему на основе двух фотоэлектронных умножителей ФЭУ-49 и временную систему, состоящую из одного ФЭУ-85 и двух ФЭУ-143.

Оба ФЭУ-49 амплитудной системы плотно без смазки прижаты к граням сцинтилляционного блока. Один ФЭУ расположен на верхней грани сцинтилляционного блока, он “просматривает” объем блока в направлении вертикальной оси симметрии (первый канал A_1, ось y). Второй ФЭУ расположен на горизонтальной грани сцинтилляционного блока параллельной траектории регистрируемых частиц, он “просматривает” объем блока в направлении горизонтальной оси симметрии, параллельной траектории частиц (второй канал A_2, ось x).

Рис. 1. Конструкция и схема калибровки и многоканального амплитудно-временного сцинтилляционного спектрометра на космическом излучении

Два ФЭУ-143 (T_1 и T_2) временной системы расположены по центрам боковых граней сцинтилляционного блока, они “просматривают” объем блока в направлении, перпендикулярном траектории пучка (рис. 1). ФЭУ-85 (T_3) расположен на верхней грани МАВСС, он “просматривает” объем блока в направлении вертикальной оси симметрии. Центр фотокатода ФЭУ-85 расположен в углу верхней грани на ее диагонали на расстояниях 31 мм от центра угла и 20 мм от каждой из сторон грани (рис. 1). В качестве отражающей поверхности в спектрометре использована белая бумага для копирования.

2.2. Электронная блок-схема калибровки многоканального амплитудно-временного сцинтилляционного спектрометра

Электронная блок-схема калибровки на космическом излучении МАВСС представлена на рис. 2. Сигналы с триггерных счетчиков S_1 и S_2 (размер счетчиков 100×100×10 мм^3) через формирователи $Ф_1$, $Ф_2$ и блоки задержек $З_1$, $З_2$ подавались на входы схемы совпадений СС. Длительность сигналов составляла 10 нс. Сигнал со схемы совпадений СС 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 $З_8$ и $З_9$ подавались сигналы с ФЭУ амплитудной системы A_1 и A_2.

Рис. 2. Блок-схема калибровки многоканального амплитудно-временного сцинтилляционного спектрометра на космическом излучении

На вход *Stop* блока ВЦП через блоки задержек $З_3$ – $З_7$ подавался сигнал со счетчиков S_3 (70×70×5 мм^3) и S_4 (170×170×10 мм^3), а также с ФЭУ временной системы T_1, T_2 и T_3. Сигналы со счетчиков S_3 и S_4 в триггер не входили, но записывались в память компьютера. Сигнал *Start* являлся также сигналом, с помощью которого через крейт-контролер (КК) системы САМАС проводилась запись сигналов в память компьютера (ПК).

В работе использовались ЗЦП и ВЦП с величиной рабочего диапазона в 1024 канала, цена одного канала ВЦП составляла 50 пс, что соответствовало рабочему диапазону 51.2 нс.

3. МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ВОДНЫЙ ЧЕРЕНКОВСКИЙ СПЕКТРОМЕТР

3.1. Конструкция многоканального водного черенковского спектрометра

Основой конструкции многоканального водного черенковского спектрометра (МВЧС) является емкость в виде цилиндра длиной 255 мм с диаметром 130 мм, заполненная дистиллированной водой, служащая радиатором для возникновения черенковского излучения при взаимодействии с ней заряженных частиц (рис. 3).

Рис. 3. Конструкция и схема калибровки и многоканального водного черенковского спектрометра на космическом излучении

Регистрация световых вспышек, возникающих от взаимодействия заряженных частиц с радиатором, осуществляется с помощью трех фотоэлектронных умножителей ФЭУ-143 (T_1, T_2 и T_3), составляющих одновременно амплитудную и временную системы. В качестве отражающей поверхности в спектрометре использована белая бумага для копирования. Делители напряжения на всех ФЭУ стандартные.

Все ФЭУ находятся на стороне емкости – противоположной стороне, через которую частицы входят в радиатор. Одно ФЭУ (T_3) расположено по центру емкости, два других – по радиусу стороны емкости (T_1 и T_2) (рис. 3). Все ФЭУ без смазки плотно прижаты к стороне емкости. Для увеличения светоотдачи внутри емкости на грани емкости, противоположной грани, на которой расположены ФЭУ, расположен отражатель из металлизированного лавсана. Емкость с радиатором и ФЭУ помещены в светонепроницаемый корпус. Амплитудная и временная системы формируются делением сигналов с каждого ФЭУ с помощью пассивных разветвителей (рис. 3 и 4).

3.2. Электронная блок-схема калибровки многоканального водного черенковского спектрометра

Электронная блок-схема калибровки МВЧС представлена на рис. 4. Сигналы с триггерных счетчиков S_1 и S_2, которые ранее использовались при калибровке МАВСС, через формирователи $Ф_1$, $Ф_2$ и блоки задержек $З_1$, $З_2$ подавались на входы схемы совпадений СС. Длительность сигналов составляла также 10 нс. Сигнал со схемы совпадений СС длительностью 100 нс являлся триггерным сигналом *Start* для запуска блоков ЗЦП и ВЦП. Сигналы с каждого из трех ФЭУ-143, как было отмечено, с помощью пассивных разветвителей делились на два сигнала и формировали амплитудную и временную системы. На входы *Анализ* блока ЗЦП через блоки задержек $З_8$ – $З_{10}$ подавались сигналы амплитудной системы A_1 – A_3. На вход *Stop* блока ВЦП через блоки задержек $З_3$ – $З_7$ подавались сигналы со счетчиков S_3 и S_4, ранее используемых при калибровке МАВСС, и временной системы T_1 – T_3. Сигнал *Start* являлся также сигналом, с помощью которого через КК проводилась запись сигналов в память ПК.

Рис. 4. Блок–схема калибровки многоканального водного черенковского спектрометра на космическом излучении…

4. КАЛИБРОВКА МНОГОКАНАЛЬНЫХ АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННОГО СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО И ВОДНОГО ЧЕРЕНКОВСКОГО СПЕКТРОМЕТРОВ НА КОСМИЧЕСКОМ ИЗЛУЧЕНИИ

Калибровки спектрометров на космическом излучении были осуществлены последовательно: сначала была проведена калибровка МАВСС, затем – МВЧС. Схемы калибровок спектрометров представлены на рис. 1, 3 соответственно. Триггерными счетчиками являлись сцинтилляционные счетчики S_1 и S_2. Для выделения из потока космического излучения жесткой компоненты (мюонов) между S_1 и S_2 был расположен свинцовый фильтр толщиной 10 см, что соответствует около 18 радиационным длинам [7, 8]. Определено, что при триггере $T = S_1S_2$ в телесном угле величиной около 0.5π ср, сформированном телескопом из счетчиклв S_1 и S_2, без свинцового фильтра интенсивность космического излучения составила примерно 0.0094 частиц/с·см^2, в присутствии фильтра – приблизительно 0.0038 частиц/с·см^2. Общее число событий, зарегистрированных при калибровках МАВСС и МВЧС, составило $N \sim 2\cdot10^5$.

Калибровка спектрометров на космическом излучении проходила в два этапа. На первом этапе последовательно были определены амплитуды сигналов амплитудных системы таким образом, чтобы амплитудные спектры с каждого ФЭУ был расположены в рабочих областях ЗЦП. Аналогичная процедура была выполнена для временных систем, но в этом случае положение временных спектров в рабочем диапазоне ВЦП определялось изменением временных задержек в блоках задержек $З_3$ – $З_7$ (рис. 2, 4).

Положение средних каналов амплитудных и временных спектров в рабочих областях ЗЦП и ВЦП определялось визуально на соответствующих гистограммах на мониторе компьютера при работе программы EtaNuc в режиме работы установки онлайн.

Обработка экспериментального материала проходила по методу “напролет”. Триггер при обработке определялся совпадением сигналов со счетчиков триггерной системы (S_1 и S_2), сигналов с ФЭУ временной системы (T_1, T_2 и T_3) и счетчика S_4 − T=$(S_1S_2)T_1T_2T_3S_4$. Такой триггер показывал, что данное событие зарегистрировано не только триггерными счетчиками (S_3 и S_4), но и всеми ФЭУ временной системы, “просматривающими” объем сцинтилляционного блока и водного радиатора. В случае МАВСС событие исключалось из обработки, если отсутствовал сигнал одного из ФЭУ амплитудной системы (A_1 или A_2).

4.1. Результаты калибровки многоканального амплитудно-временного сцинтилляционного спектрометра

4.1.1. Энергетические характеристики МАВСС. На рис. 5 представлены амплитудный и энергетический спектры мюонов, зарегистрированные МАВСС.

Рис. 5. Спектры космических мюонов, зарегистрированные многоканальным амплитудно-временным сцинтилляционным спектрометром

Амплитудный спектр (рис. 5а) является суммой сигналов с ФЭУ-49 амплитудной системы. Энергетический спектр (рис. 5б), являющийся сутью калибровки, определялся следующим образом: среднее энерговыделение, которое оставляет космический мюон в объеме МАВСС, составляет около $E \approx LdE/dx = 20 \cdot 2 \approx 40$ МэВ, где $L = 20$ см – толщина МАВСС, $dE/dx \approx 2$ МэВ/см – средняя величина ионизационных потерь электронов на единицу пути в сцинтилляторе [3, 6].

Относительное энергетическое разрешение спектра космических мюонов (рис. 5б) составило $\delta = \sigma/\langle E \rangle = \text{FWHM}/2.35/\langle E \rangle \approx 13\%$ (FWHM – полная ширина на половине высоты энергетического спектра [6]). Таким образом, среднее энерговыделение в МАВСС, оставленное одиночными космическими мюонами, составило $\langle E \rangle = 40.0 \pm 12$ МэВ, что удовлетворяет требованию модельного расчета, показывающего, что для надежного выделения энергетического пика “аномальных лептонов” точность определения энергии спектрометром должна составлять 10–15%.

4.1.2. Временные характеристики МАВСС. На рис. 6 представлены временные спектры, определенные временной системой МАВСС (T_1, T_2, T_3).

Рис. 6. Временные спектры…

Из рис. 6 определяются временные разрешения каналов МАВСС: $\Delta T_1 = 95$ каналов, $\Delta T_2 = 80$ каналов и $\Delta T_3 = 59$ каналов. С учетом цены канала ВЦП $\Delta T = 50$ пс, разрешения каналов МАВСС имеют следующие значения: $\Delta T_1 = 4750$ пс, $\Delta T_2 = 4000$ пс, $\Delta T_3 = 2590$ пс. Данный результат означает, что временные разрешения каналов T_1 и T_2, использующих ФЭУ-143, имеют худшие значения по сравнению с таковым для канала T_3, в котором используется ФЭУ-85 ($\Delta T_1 > \Delta T_3$, $\Delta T_2 > \Delta T_3$). Этот эффект можно объяснить регистрацией ФЭУ T_3 в большей степени прямого света, в отличие от регистрации света ФЭУ T_1 и T_2, регистрирующих, помимо прямого света, еще и отраженный, имеющий некоторое время запаздывания [4].

На рис. 7 видно, что наиболее компактный вид распределения соответствует каналу T_3, имеющему ФЭУ-85, что подтверждает вывод о лучшем временном разрешении канала T_3 по сравнению с каналами T_1 и T_2.

Рис. 7. Временные распределения каналов T_1, T_2 и T_3 относительно счетчика S_3…

Временная точность каналов очень важна, поскольку если “тяжелые лептоны” существуют, то их положения на временных спектрах типа рис. 7 по временным значениям на осях T_1, T_2 и T_3 будут находиться ниже положений основных пучков электронов (позитронов), вид которых показан на рис. 7. Чем выше временная точность канала спектрометра, тем дальше на временных шкалах осей будут находиться друг от друга “пятна” событий “тяжелых лептонов” и основного пучка электронов (позитронов).

4.2. Результаты калибровки многоканального водного черенковского спектрометра

4.2.1. Энергетические характеристики МВЧС. Триггер при обработке экспериментального материала определялся как $T = (S_1S_2)T_1T_2T_3$, он показывал, что данное событие зарегистрировано всеми временными ФЭУ, “просматривающими” объем емкости.

Амплитудный спектр (рис. 8а) является суммой сигналов A_1, A_2, A_3 амплитудной системы. Энергетический спектр на рис. 9б, являющийся сутью калибровки, определялся, как и в случае МАВСС, по величине среднего энерговыделения $E \approx 51$ МэВ, которое оставляет космический мюон в объеме МВЧС [5].

Относительное энергетическое разрешение спектра космических мюонов (рис. 8б) составило $\delta = \sigma/\langle E\rangle = FWHM/2.35/\langle E\rangle \approx 30.6\%$. Таким образом, среднее энерговыделение в МВЧС, оставленное одиночными космическими мюонами, составило $\langle E\rangle = 51.0 \pm 16$ МэВ, что не удовлетворяет требованию модельного расчета.

Рис. 8. Спектры космических мюонов, зарегистрированных многоканальным водным черенковским спектрометром

4.2.2. Временные характеристики МВЧС. На рис. 9 представлены временные спектры T_1, T_2 и T_3 каналов МВЧС, временные разрешения которых имеют следующие значения: ΔT_1 = 63 канала, ΔT_2 = 155 каналов и ΔT_3 = 46 каналов. С учетом цены канала ВЦП $\Delta t_{ВЦП}$ = 50 пс разрешения каналов МАВСС имеют следующие значения: ΔT_1 = 3150 пс, ΔT_2 = 7750 пс и ΔT_3 = 2300 пс.

Рис. 9. Временные спектры временных каналов:

Данный результат означает, что временные каналы T_1 и T_2 регистрируют не только прямой свет черенковского излучения, средний канал которого является примерно 450-м, но

и отраженный свет от боковой стороны емкости. Временной интервал отраженного света в спектрах T_1 и T_2 расположен в диапазоне ΔT_1 ~ 580–880 каналов и ΔT_2 ~ 500–800 каналов соответственно. Данный эффект ухудшает временное разрешение каналов T_1 и T_2 по сравнению с разрешением канала T_3, находящегося по центру МВЧС.

Более детально соотношения между прямым и отраженным светом видно на рис. 10, на котором представлены временные распределения каналов T_1, T_2 и T_3 относительно счетчика S_3. Из рис. 10 видно, что, как и в случае МАВСС, наиболее компактный вид распределения соответствует каналу T_3, имеющему ФЭУ-85, что подтверждает вывод о лучшем временном разрешении канала T_3 по сравнению с каналами T_1 и T_2.

Рис. 10. Временные распределения каналов T_1, T_2 и T_3 относительно счетчика S_3…

На рис. 6в, 7в, 9в и 10в видно, что временной спектр T_3 черенковского спектрометра $\Delta T_3 = \Delta T_{3\ чер} = 2300$ пс *уже* аналогичного спектра сцинтилляционного спектрометра $\Delta T_3 = \Delta T_{3\ сц} = 2590$ пс примерно на 13%.

5. КООРДИНАТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОКАНАЛЬНЫХ АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННОГО СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО И ВОДНОГО ЧЕРЕНКОВСКОГО СПЕКТРОМЕТРОВ

Координаты вхождения мюонов в спектрометры определялись по сигналам с ФЭУ каналов T_1 и T_2 по следующим формулам:

$$x_i = (x_{i1} + x_{i2})/2, \quad (1)$$

где x_{i1} и x_{i2} являлись координатами положения трека, определенными по времени прихода света от точки взаимодействия i -го мюона со спектрометром до каждого из ФЭУ T_1 и T_2;

$$x_{i1(2)} = x_0 \cdot (1 - t_{1i(2)}/\langle t_{i1(2)} \rangle), \quad (2)$$

где x_0 – центр спектрометра (x_0 = 10.0 см), $t_{i1(2)}$ – время прохождения света от точки взаимодействия электрона со спектрометром до первого (T_1) или второго (T_2) фотокатода ФЭУ, измеренное с помощью ВЦП, $\langle t_{i1(2)} \rangle$ – среднее время прохождения света от точки входа мюона в спектрометр до фотокатода ФЭУ, являющийся средним каналом временного спектра первого T_1 (второго T_2) ФЭУ (рис. 6а,б и рис. 9а,б) [9].

На рис.11 представлены спектры координат, определенные по каналам T_1 и T_2 для МАВСС и МВЧС. Координатные разрешения, определенные по значениям полной ширины на половине высот координатных спектров, составили $\Delta x_{МАВСС} = 1.8 \pm 0.3$ см и $\Delta x_{МВЧС} = 1.2 \pm 0.2$ см.

Рис. 11. Распределения координат …

Пик, лежащий левее основного пика на рис. 11б, сформирован сигналами отраженного света и является паразитным. Его можно исключить, поставив временные пороги в спектрах T_1 и T_2 на рис. 9а,б ($T_{1\ порог}$ = 580-й канал ВЦП, $T_{2\ порог}$ = 520-й канал ВЦП).

6. 7. СООТНОШЕНИЕ ВРЕМЯ–ЭНЕРГИЯ

Соотношение время–энергия для канала T_3 и энерговыделений мюонов в МАВСС и МВЧС представлено на рис. 12.

Соотношение для МАВСС определяется практически симметричной областью с центром $\langle E \rangle \approx 40$ МэВ и $\langle T_3 \rangle \approx 560$ каналов ВЦП (рис. 6в) и шириной по соответствующим осям $\Delta E \approx 30$ МэВ и $\Delta T_3 \gtrsim 110$ каналов ВЦП. В случае МВЧС характер соотношения иной. Центр области определяется $\langle E \rangle \approx 50$ МэВ и $\langle T_3 \rangle \approx 480$ каналов ВЦП (рис. 9в), а значения ширины по соответствующим осям составляют $\Delta E \approx 90$ МэВ и $\Delta T_3 \gtrsim 90$ каналов ВЦП. Увеличение ширины области соотношения по оси энергии можно объяснить большей величиной энергии, регистрируемой МВЧС ($\langle E \rangle \approx 51$ МэВ), и большей относительной ошибкой определения энергии по сравнению с аналогичной ошибкой МАВСС ($\delta_{МАВСС} \approx 13\%$ и $\delta_{МВЧС} \approx 30.6\%$).

Рис. 12. Соотношение время–энергия для канала T_3 и энерговыделений мюонов

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для регистрации и определения энергии заряженных частиц, образованных в мишени при взаимодействии с ней фотонного пучка в эксперименте по поиску “аномальных лептонов” на ускорителе С-25Р “Пахра” Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук в Троицке, созданы многоканальный амплитудно-временной сцинтилляционный спектрометр и многоканальный водный черенковский спектрометр, включающие амплитудную и временную системы. С целью определения амплитудных, временных и координатных характеристик спектрометров на одиночных мюонах космического излучения проведены их калибровки.

Средние энерговыделения мюонов в объемах МАВСС и МВЧС составили $\langle E \rangle = 40.0 \pm 12$ МэВ и $\langle E \rangle = 51 \pm 16$ МэВ (относительное энергетическое разрешение спектрометров $\delta_{МАВСС} \approx 13\%$ и $\delta_{МВЧС} \approx 30.6\%$). Временные разрешения каналов T_3 МАВСС и МВЧС составили $\Delta T_{МАВСС} \approx 2.6$ нс и $\Delta T_{МАВСС} \approx 2.3$ нс. Временное разрешение МВЧС примерно на 11% лучше по сравнению с таковым у МАВСС ($\Delta t \approx 0.3$ нс). Координатные разрешения МАВСС и МВЧС, определенные на основе сигналов с ФЭУ T_1 и T_2, составили $\Delta x_{МАВСС} = 1.8 \pm 0.3$ см и $\Delta x_{МВЧС} = 1.2 \pm 0.2$ см соответстсвенно.

Общий вывод – МАВСС и МВЧС можно использовать в установке по поиску “тяжелых лептонов”. Энергетические характеристики МАВСС соответствуют требуемым значениям модельного расчета, а временные характеристики МВЧС позволяют использовать данный спектрометр в качестве счетчика *Stop* во времяпролетном методе при энергиях частиц в десятки МэВ с целью более эффективного определения типа частиц.

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. *Ахмад С.М., Алексеев В.И., Басков В.А., и др.* ПТЭ. 2025. № 5. С.92 https://doi.org/10.7868/S3034564225050012
4. *Ахмад С.М., Алексеев В.И., Басков В.А. и др.* ПТЭ. 2025. № 6. С.18. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=88955430
5. *Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А. и др.* ПТЭ. 2021. № 1. С. 40. https://doi.org/10.31857/S003281622101002X .
6. *Мухин К.Н.* Ядерная физика. Часть I. М.: Энергоатомиздат, 1993.
7. *Мурзин В.С.* Введение в физику космических лучей. М.: Атомиздат, 1979.
8. *Петрунькин А.А., Богданов А.Г., Кокоулин Р.П.* Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2018. Т. 49. № 4. С. 1124. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41457464
9. *Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А. и др.* ПТЭ. 2024. № 3. С.4. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=77095332

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Конструкция и схема калибровки многоканального амплитудно-временного сцинтилляционного спектрометра на космическом излучении: *1* – сцинтилляционный блок, *2* – копировальная бумага, *3* – черная бумага, *4* – делители напряжения ФЭУ-49, ФЭУ-85 и ФЭУ-143; S_1 – S_4 – сцинтилляционные счетчики; A_1 и A_2 – ФЭУ-49 (амплитудная система); T_1 и T_2 – ФЭУ-143, T_3 – ФЭУ-85 (временная система)

Рис. 2. Блок-схема калибровки многоканального амплитудно-временного сцинтилляционного спектрометра на космическом излучении: $Ф_1$–$Ф_6$ – блоки формирователей; $З_1$–$З_8$ – блоки задержек, СС – схема совпадений, ЗЦП – зарядочувствительный цифровой преобразователь, ВЦП – время-цифровой преобразователь, *Start* – сигнал запуска блоков ЗЦП и ВЦП, *Stop* – временные сигналы, *Анализ* – амплитудные сигналы, КК – крейт-контроллер системы САМАС, ПК – персональный компьютер.

Рис. 3. Конструкция и схема калибровки и многоканального водного черенковского спектрометра на космическом излучении: *1* – водный радиатор, *2* – емкость, *3* – бумажный отражатель, *4* – корпус, *5* – ФЭУ-143, *6* – делитель напряжений.

Рис. 4. Блок-схема калибровки многоканального водного черенковского спектрометра на космическом излучении: $Ф_1$–$Ф_7$ – блоки формирователей, $З_1$–$З_{10}$ – блоки задержек, СС – схема совпадений, ЗЦП – зарядочувствительный цифровой преобразователь, ВЦП – время-цифровой преобразователь, *Start* – сигнал запуска блоков ЗЦП и ВЦП, *Stop* – временные сигналы, *Анализ* – амплитудные сигналы с амплитудных каналов, КК – крейт-контроллер системы САМАС, ПК – персональный компьютер.

Рис. 5. Спектры космических мюонов, зарегистрированные многоканальным амплитудно-временным сцинтилляционным спектрометром: **а** – амплитудный спектр суммы сигналов двух ФЭУ-49, **б** – энергетический спектр

Рис. 6. Временные спектры, зарегистрированные многоканальным амплитудно-временным сцинтилляционным спектрометром : **а** – канал T_1, **б** – канал T_2, **в** – канал T_3.

Рис. 7. Временные распределения каналов T_1–T_3 относительно счетчика S_3: **а** – канал T_1, **б** – канал T_2, **в** – канал T_3

Рис. 8. Спектры космических мюонов, зарегистрированных многоканальным водным черенковским спектрометром: **а** – амплитудный спектр суммы сигналов трех ФЭУ-143 амплитудной системы, **б** – энергетический спектр черенковского излучения в водном радиаторе

Рис. 9. Временные спектры, зарегистрированные многоканальным водным черенковским спектрометром: **а** –канал T_1, **б** – канал T_2, **в** – канал T_3

Рис. 10. Временные распределения каналов T_1–T_3 относительно счетчика S_3: **а** –канал T_1, **б** – канал T_2, **в** – канал T_3

Рис. 11. Распределения координат для многоканального амплитудно-временного сцинтилляционного спектрометра (**а**) и для многоканального водного черенковского спектрометра (**б**), определенные на основе временных сигналов от каналов T_1 и T_2

Рис. 12. Соотношение время–энергия для канала T_3 и энерговыделений мюонов для многоканального амплитудно-временного сцинтилляционного спектрометра (**а**) и многоканального водного черенковского спектрометра (**б**)

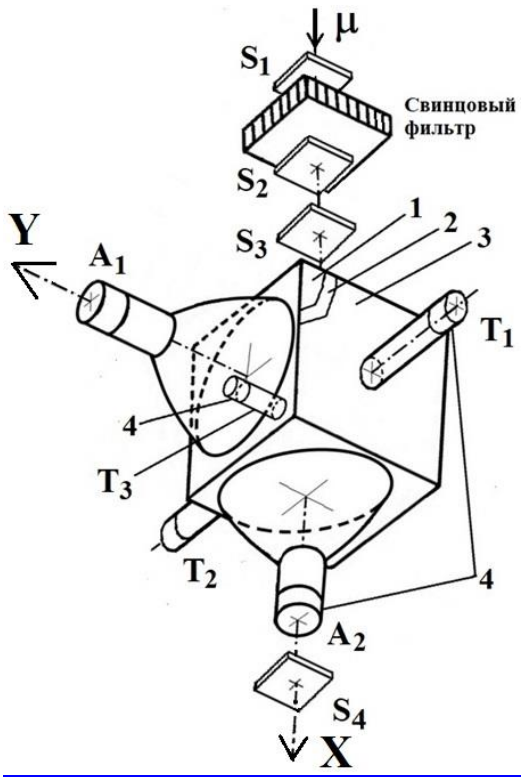


Рис. 1.

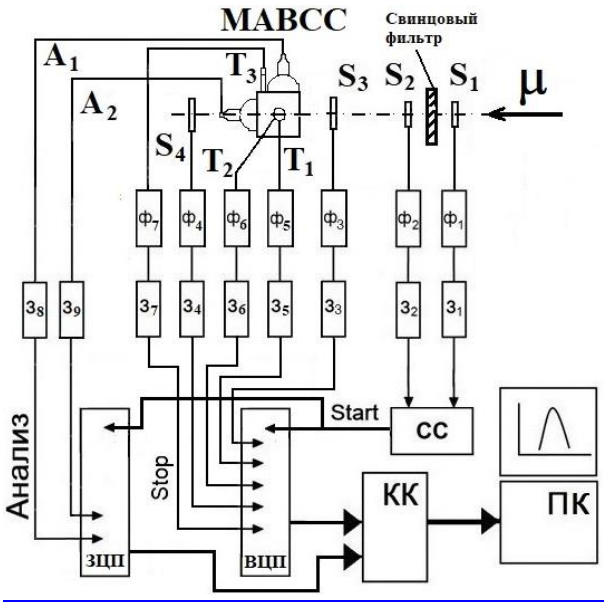

МАВСС
Свинцовый фильтр
A1
A2
T3
T2
T1
S4
S3
S2
S1
μ
Ф7
Ф4
Ф6
Ф5
Ф3
Ф2
Ф1
З8
З9
З7
З4
З6
З5
З3
З2
З1
Start
СС
Анализ
Stop
ЗЦП
ВЦП
КК
ПК

Рис. 2.

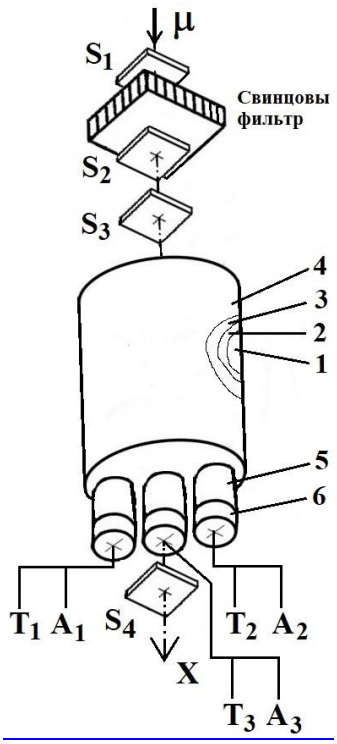


Рис. 3.

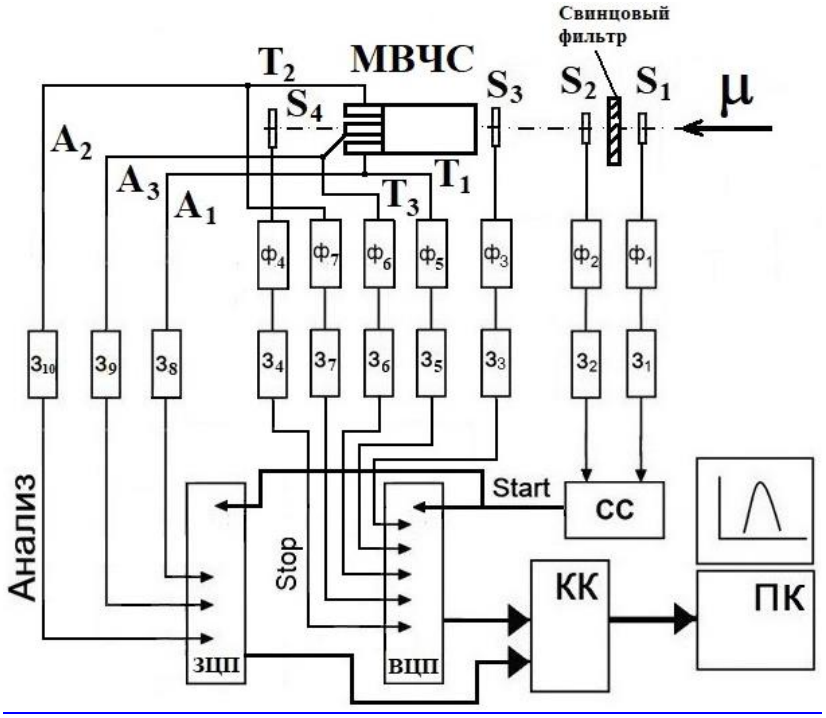
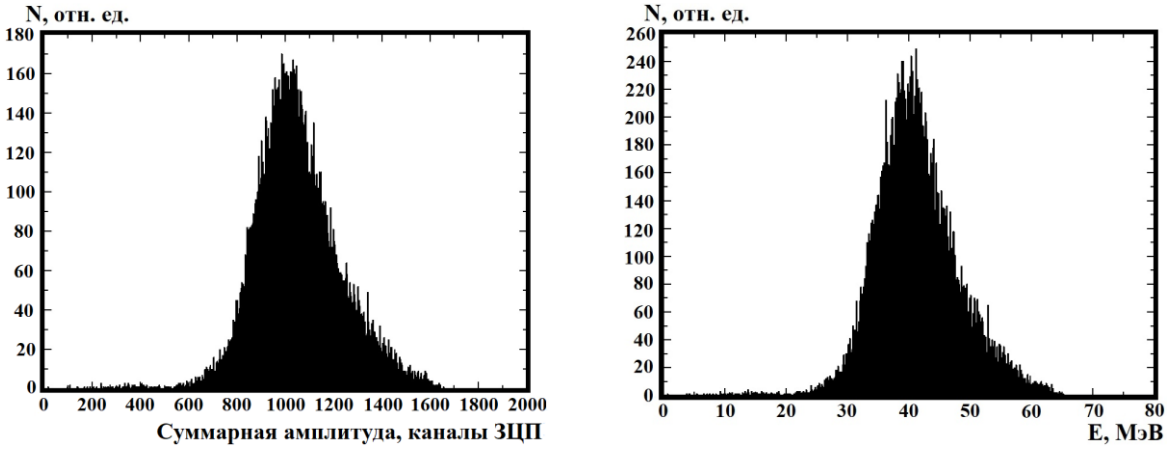
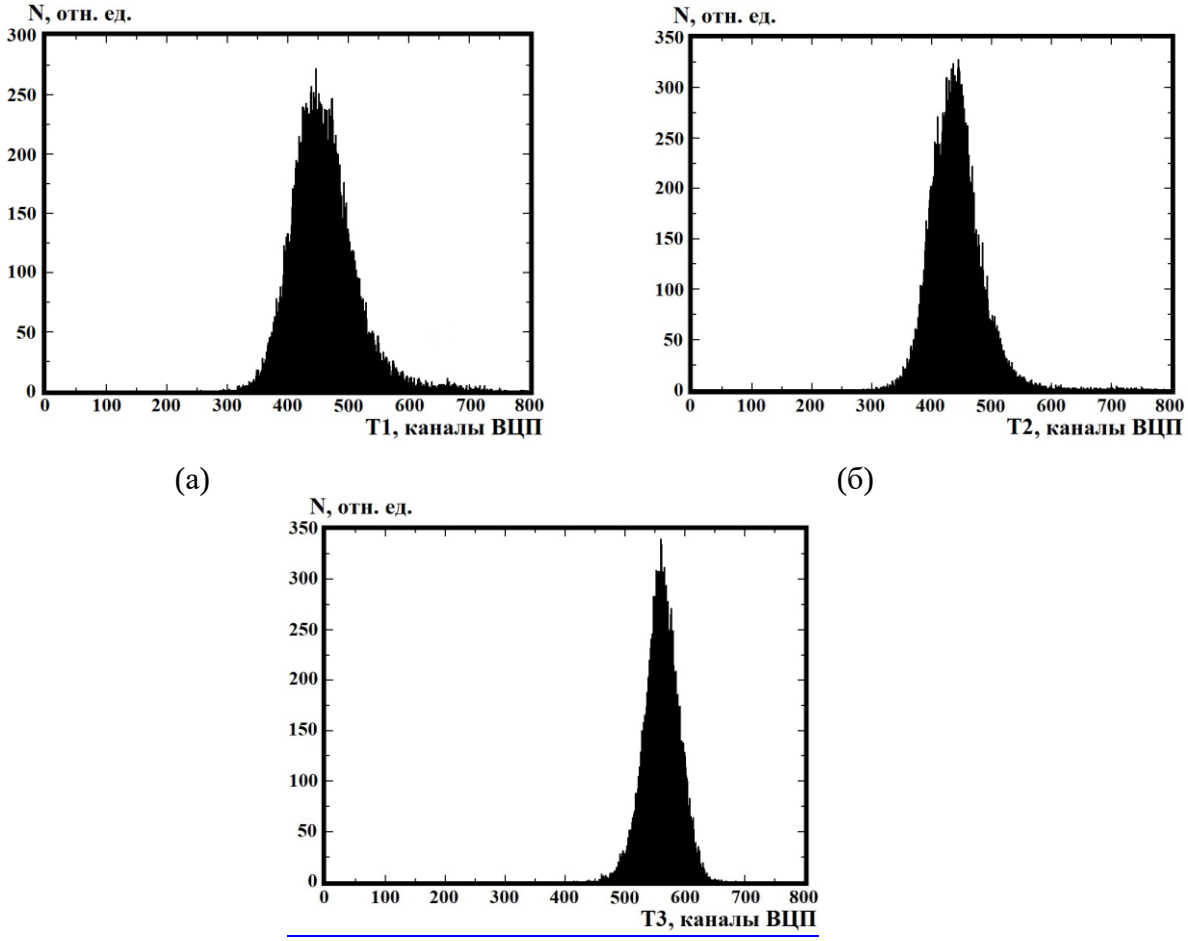

Свинцовый фильтр
T2
МВЧС
S3
S2
S1
μ
S4
A2
A3
A1
T3
T1
Ф4
Ф7
Ф6
Ф5
Ф3
Ф2
Ф1
З10
З9
З8
З4
З7
З6
З5
З3
З2
З1
Start
СС
Анализ
Stop
КК
ПК
ЗЦП
ВЦП

Рис. 4.


N, отн. ед.
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0 200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800 2000
Суммарная амплитуда, каналы ЗЦП
N, отн. ед.
260
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0 10 20 30 40 50 60 70 80
E, МэВ

(а) (б)

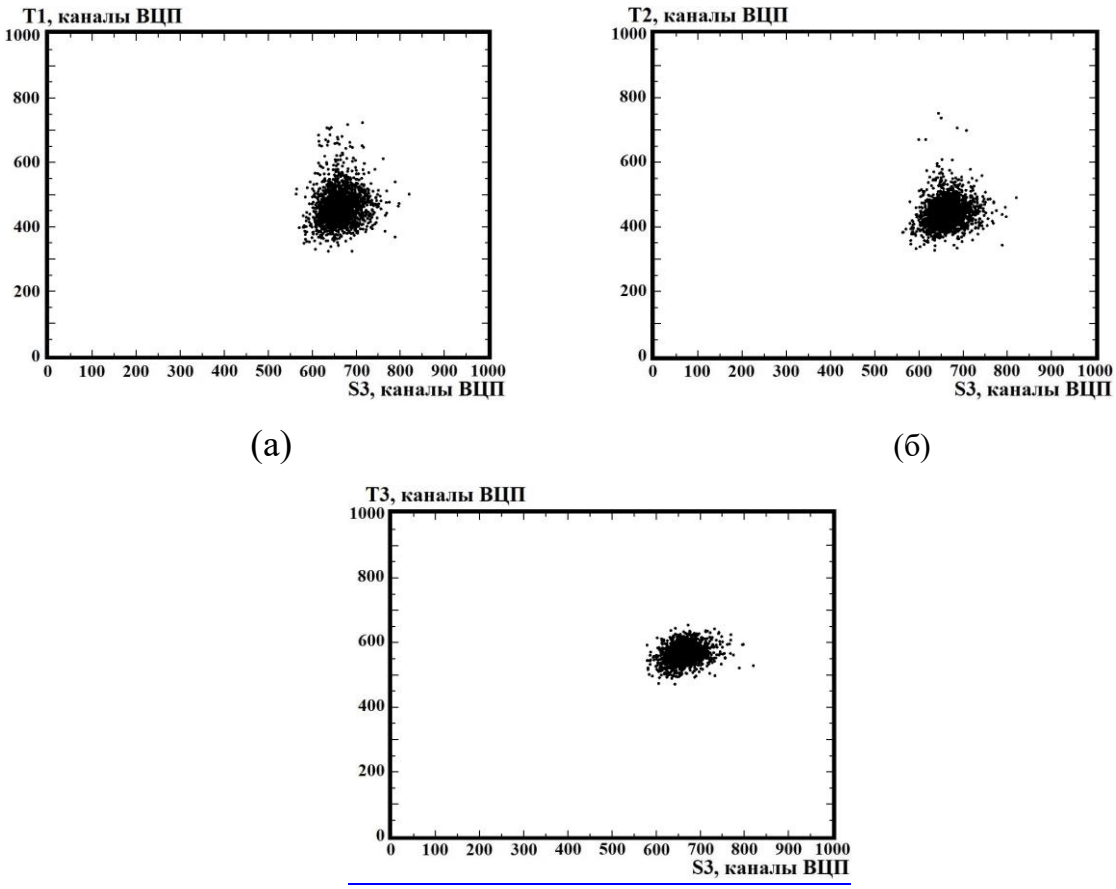
Рис. 5.


N, отн. ед.
T1, каналы ВЦП
N, отн. ед.
T2, каналы ВЦП
N, отн. ед.
T3, каналы ВЦП

(а) (б)

(в)

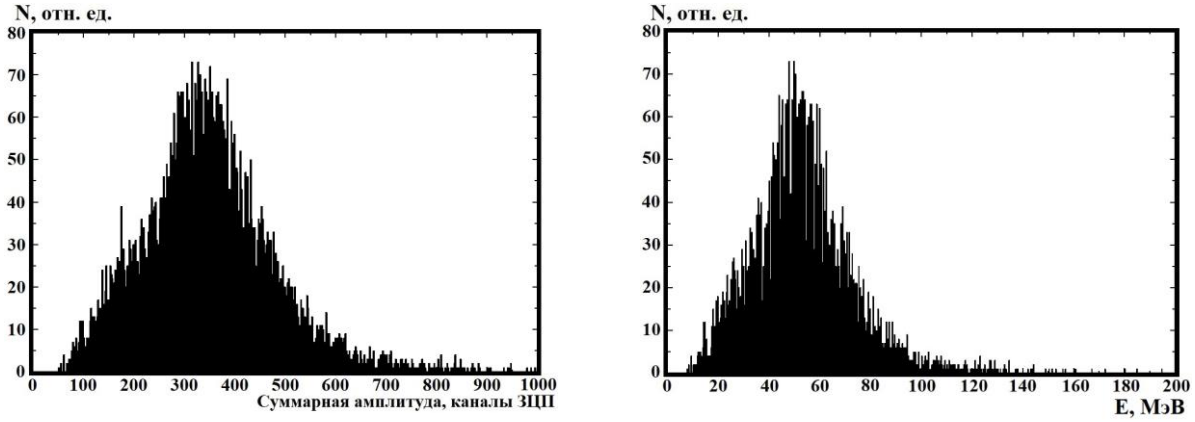
Рис. 6.


T1, каналы ВЦП
T2, каналы ВЦП
T3, каналы ВЦП
S3, каналы ВЦП
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000

(а) (б)

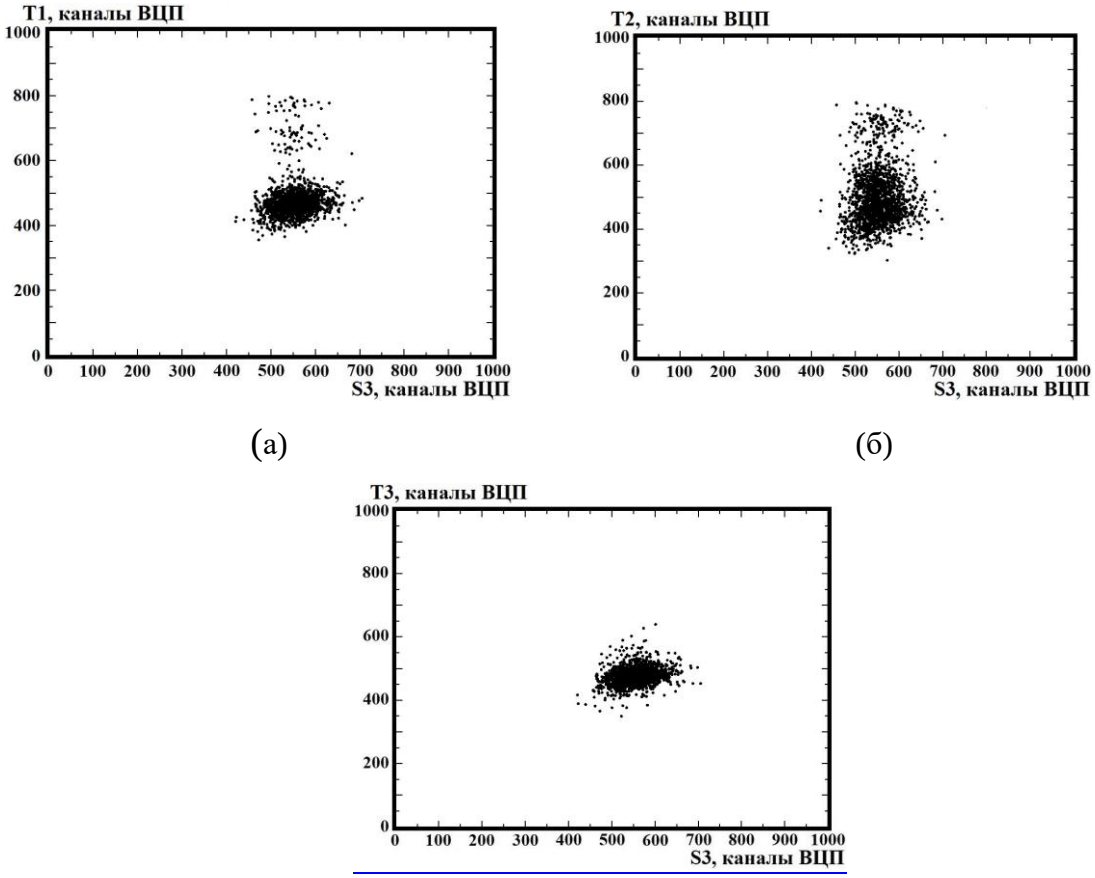
(в)

Рис. 7.


N, отн. ед.
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000
Суммарная амплитуда, каналы ЗЦП
N, отн. ед.
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200
E, МэВ

(а) (б)

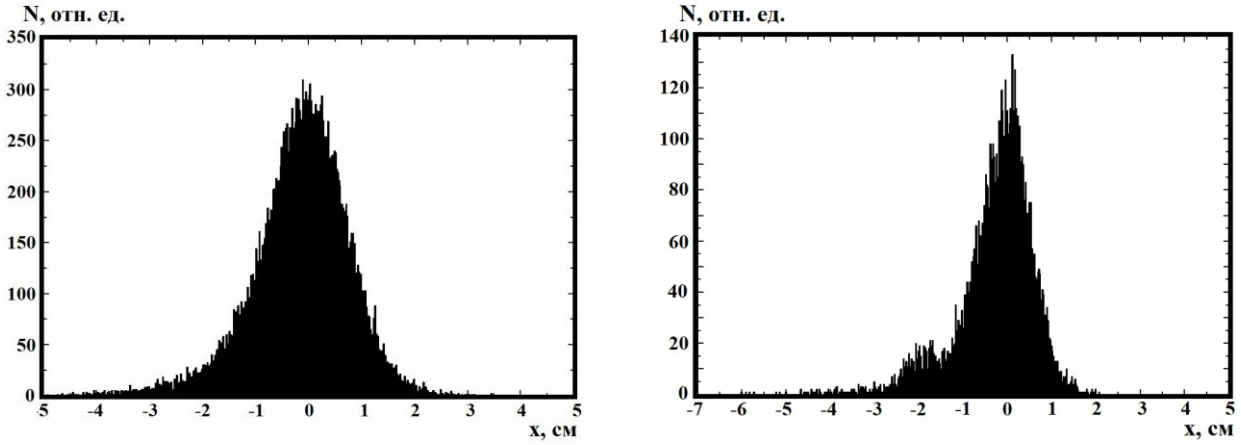
Рис. 8.


T1, каналы ВЦП
T2, каналы ВЦП
T3, каналы ВЦП
S3, каналы ВЦП
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000

(а) (б)

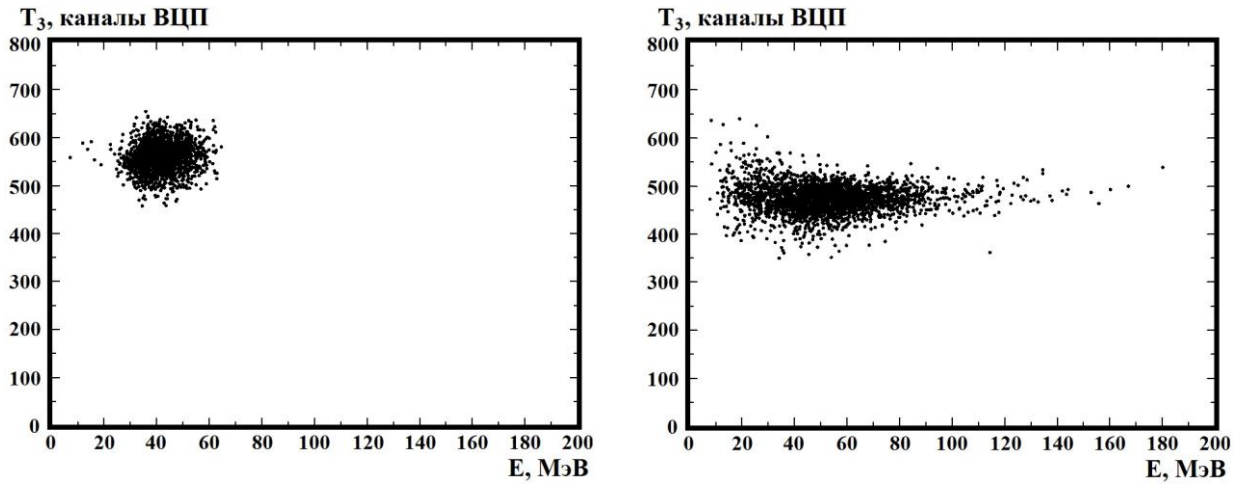
(в)

Рис. 10.


N, отн. ед.
350
300
250
200
150
100
50
0
-5
-4
-3
-2
-1
0
1
2
3
4
5
x, см
N, отн. ед.
140
120
100
80
60
40
20
0
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
1
2
3
4
5
x, см

(а) (б)

Рис. 11.


T3, каналы ВЦП
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200
E, МэВ
T3, каналы ВЦП
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200
E, МэВ

(а) (б)

Рис. 12.