



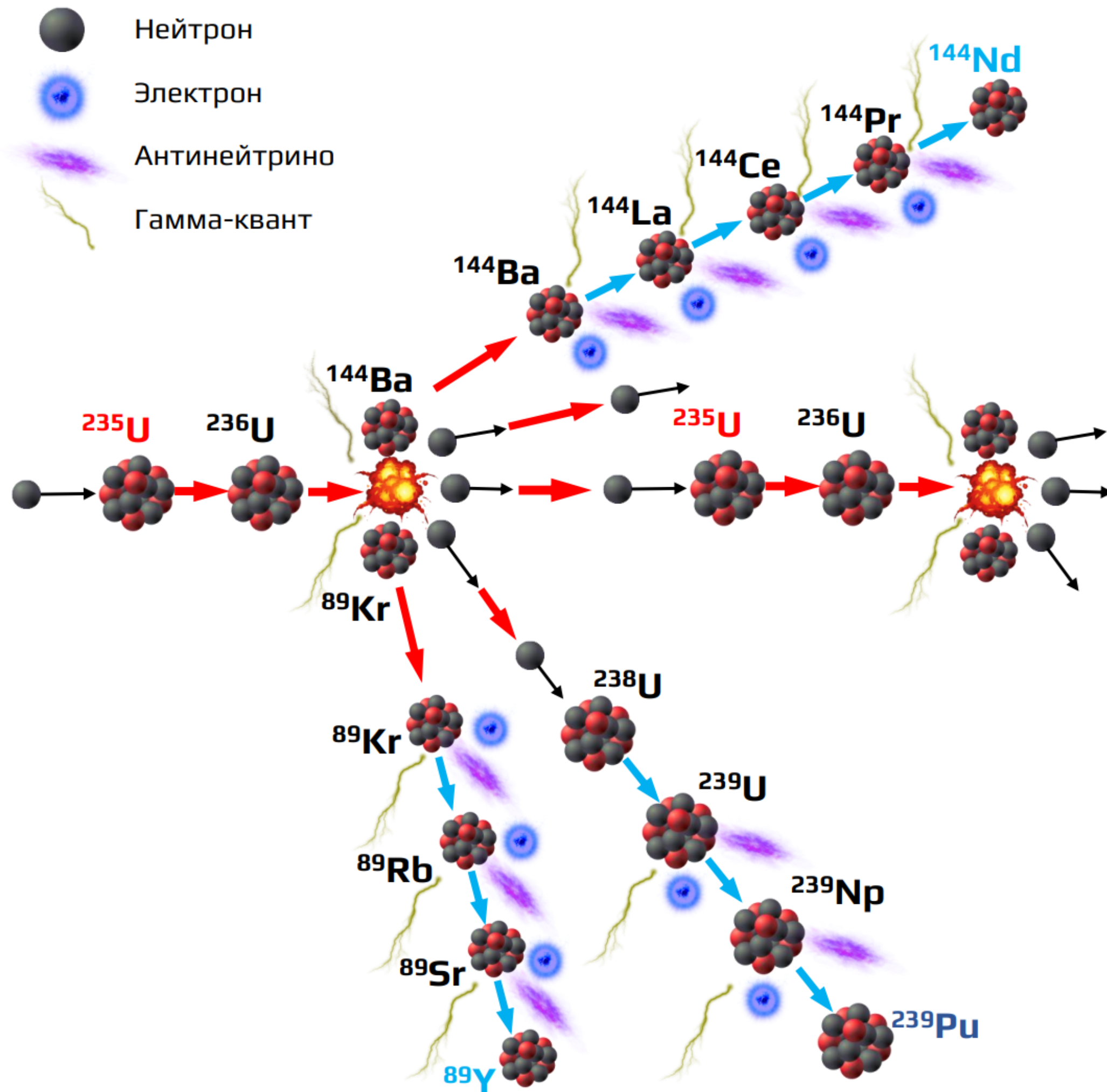
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



Разработка сцинтилляционного спектрометра для измерения энергетических спектров бета-частиц продуктов деления изотопов урана и плутония

Студент: Сушкова Полина Игоревна
Научный руководитель: Попов Даниэль Валерьевич
Научный консультант: Долганов Григорий Дмитриевич

Методы получения спектров реакторных антинейтрино



Метод ab initio:

суммирование спектров от всех бета-активных осколков деления ядерного топлива с учётом активности каждого изотопа.

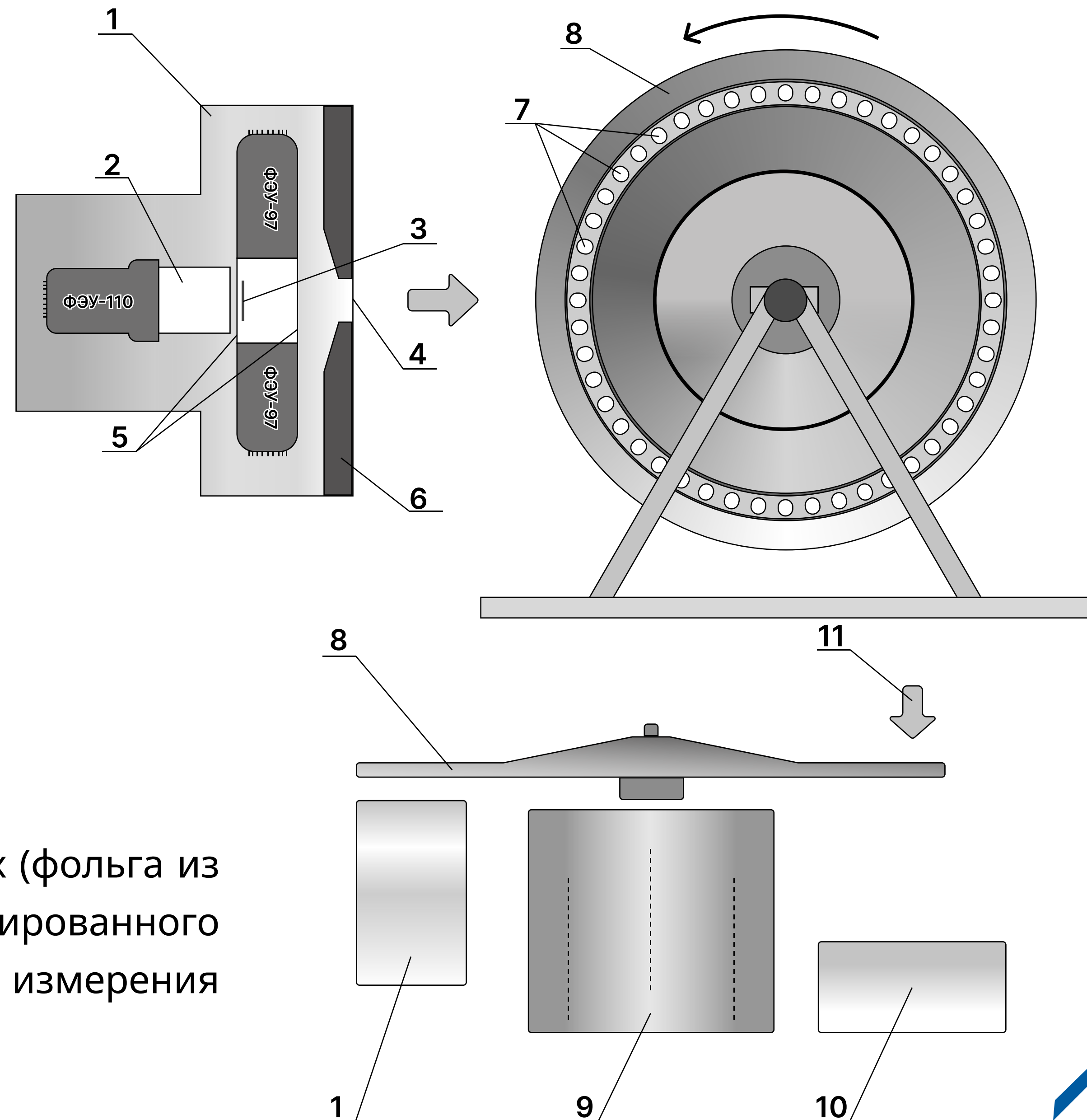
Метод конверсии:

получение спектров реакторных антинейтрино путем преобразования экспериментальных спектров бета-частиц.

Установка БЕТА НИЦ КИ

- 1 – бета-спектрометр
- 2 – основной сцинтиллятор из стильбена
- 3 – тонкий пролетный пластиковый сцинтиллятор
- 4 – тонкая майларовая мембрана
- 5 – светоотражающие майларовые пленки
- 6 – коллиматор
- 7 – мишени
- 8 – вращающийся дюралюминиевый диск
- 9 – комбинированная пассивная защита
- 10 – поглотитель нейтронного потока
- 11 – нейтронный поток

Мишени (16 из U-235 и 16 из Pu-239) в защитных оболочках (фольга из алюминия, фольга из полиэтилена + фольга из алюминизированного полиэтилена); аналогичные «пустые» оболочки (16 ячеек) – измерения фона.



Цель работы:

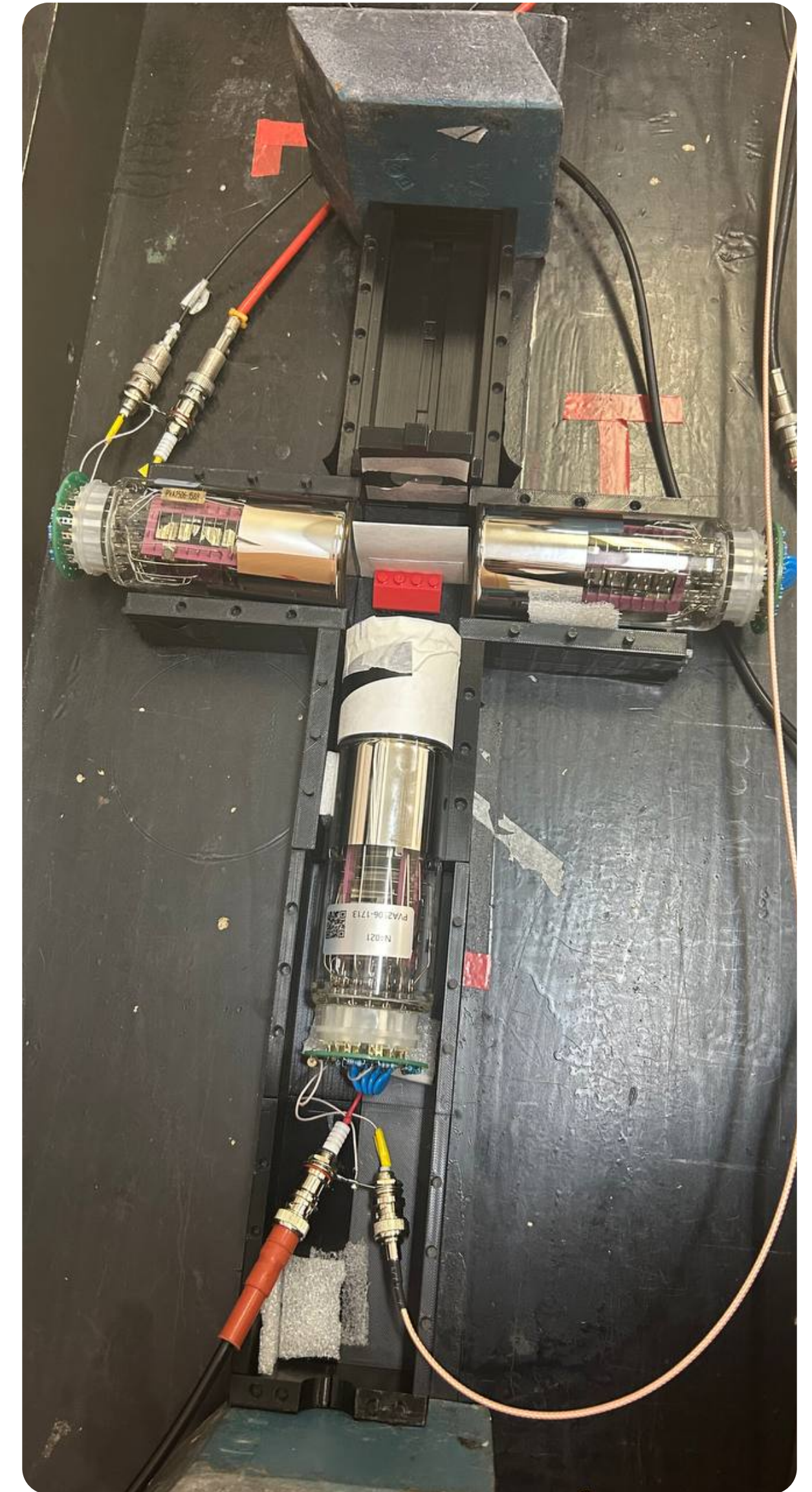
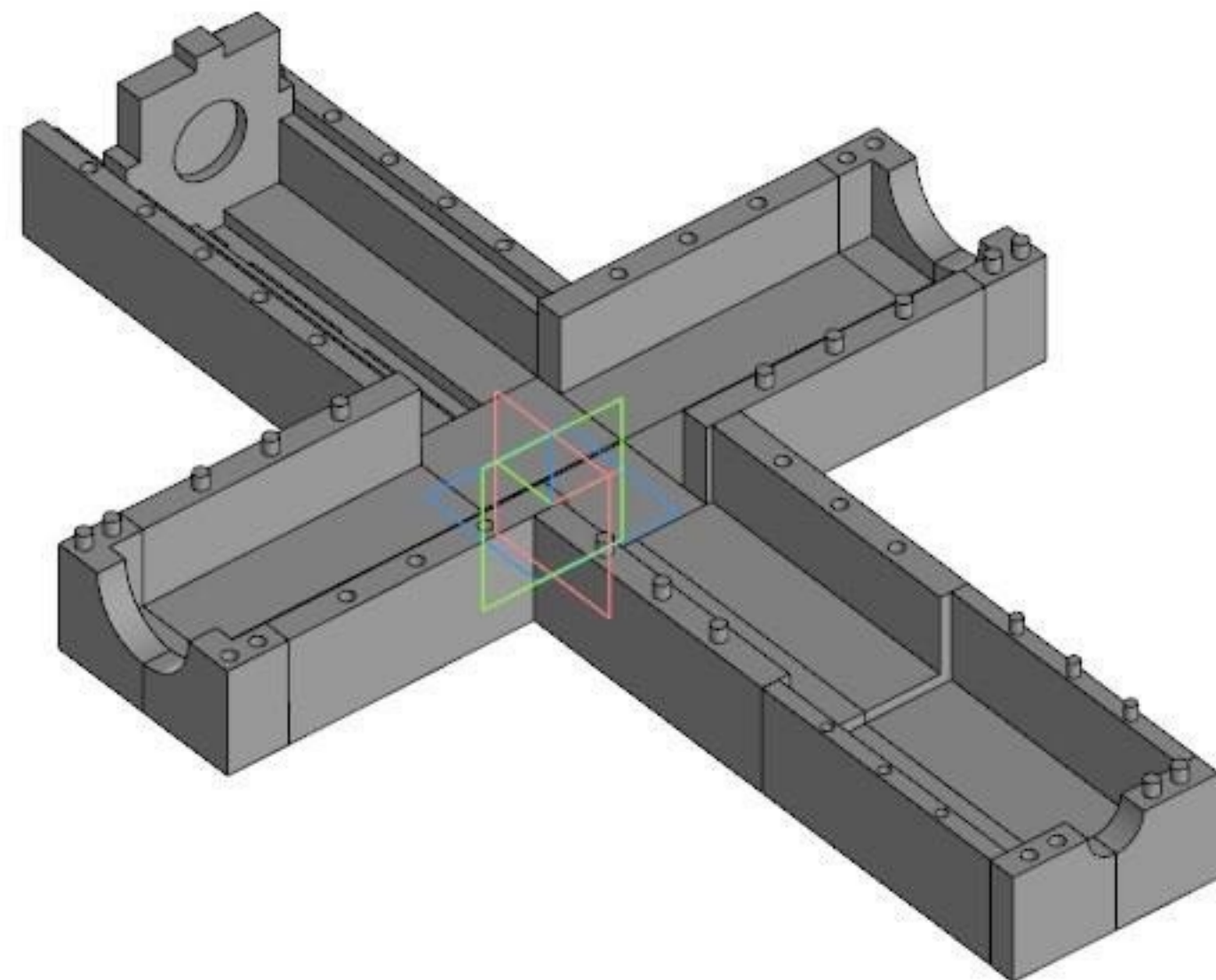
Разработка сцинтилляционного спектрометра для измерения энергетических спектров бета-частиц продуктов деления изотопов урана и плутония.

Задачи:

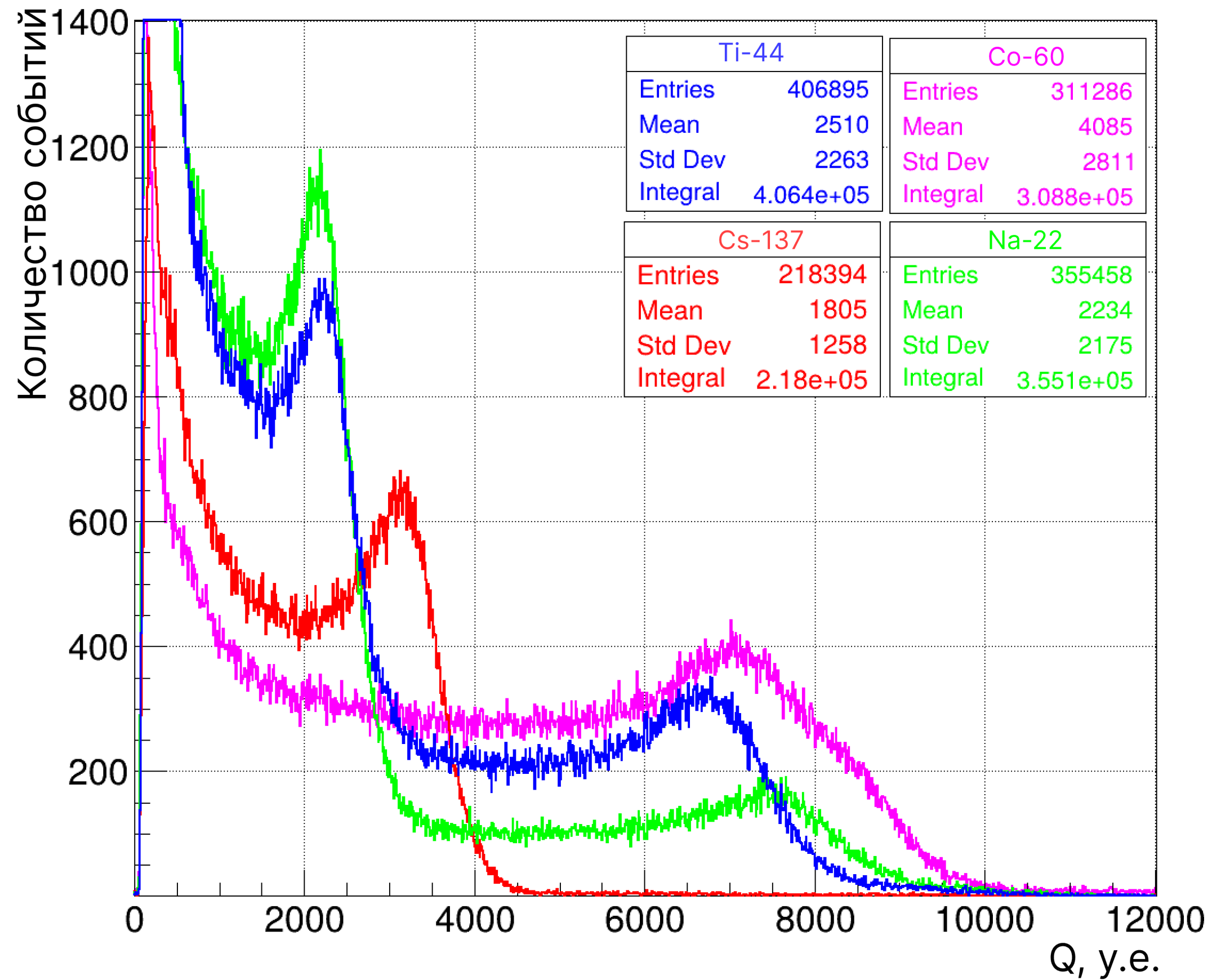
1. Провести качественные измерения аппаратных кривых отклика детектора на набор калибровочных источников гамма- и бета-излучения Cs-137, Na-22, Co-60, Ti-44, Sr-Y-90, Bi-207 (электроны конверсии).
2. С использованием моделирования методом Монте-Карло выполнить калибровку энергетической шкалы основного Е-детектора.
3. Получить энергетические спектры от источника Bi-207 с выделенными конверсионными линиями (482 и 991 кэВ), определить энергетическое разрешение при 1 МэВ и провести сравнительный анализ с результатами аналогичных работ.
4. Исследовать влияние защитных фольг мишени на форму регистрируемого спектра-бета частиц с помощью тонких свинцовых фольг, а так же алюминизированного полиэтилена, используемого в качестве оболочек мишеней из U-235 и Pu-239 в эксперименте БЕТА.
5. Провести сравнение светоотражающих материалов (Tyvek, Mylar, Lumirror, ESR 3M) и выбрать оптимальный вариант, обеспечивающий максимальный светосбор, для основного сцинтиллятора.
6. Собрать прототип бета-спектрометра установки БЕТА-2 и получить первые аппаратные кривые отклика спектрометра на калибровочные источники.

Прототип бета-спектрометра установки БЕТА

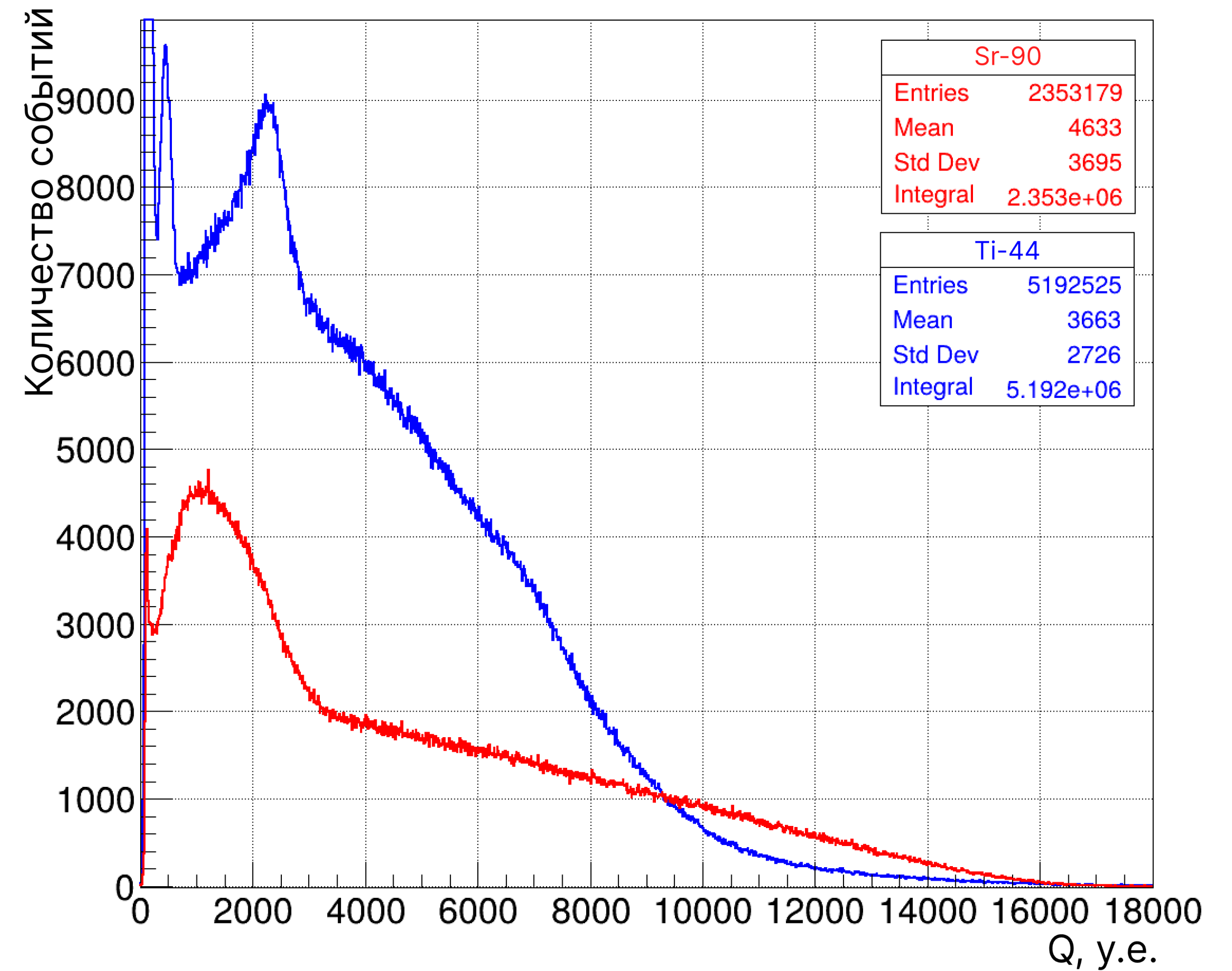
- Тонкий пластиковый сцинтиллятор, состоящий из полистирола, р-терфинала и ПОПОП, размерами 5 x 5 см и толщиной 325 мкм, плотностью 1.03 гр/см³.
- Основной пластиковый сцинтиллятор, состоящий из полистирола, р-терфинала и ПОПОП, в виде цилиндра длиной 5 см и диаметром 5 см, плотностью 1.03 гр/см³.
- Три фотоэлектронных умножителя, с эффективным диаметром фотокатода 46 мм.
- Сцинтилляторы обернуты в светоотражающий материал.



Экспериментальные данные

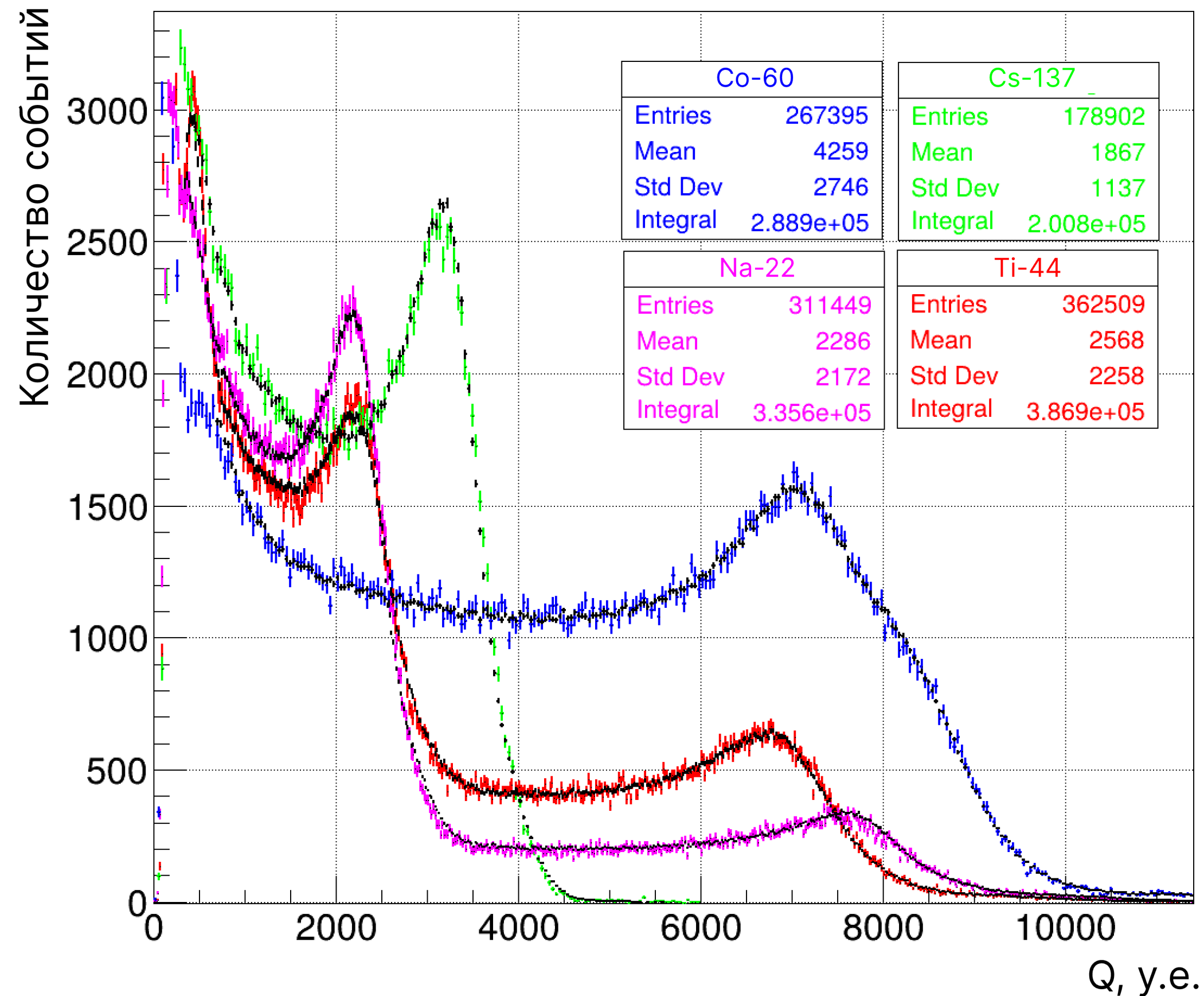


Аппаратурная кривая отклика Е-детектора на калибровочные гамма-источники.

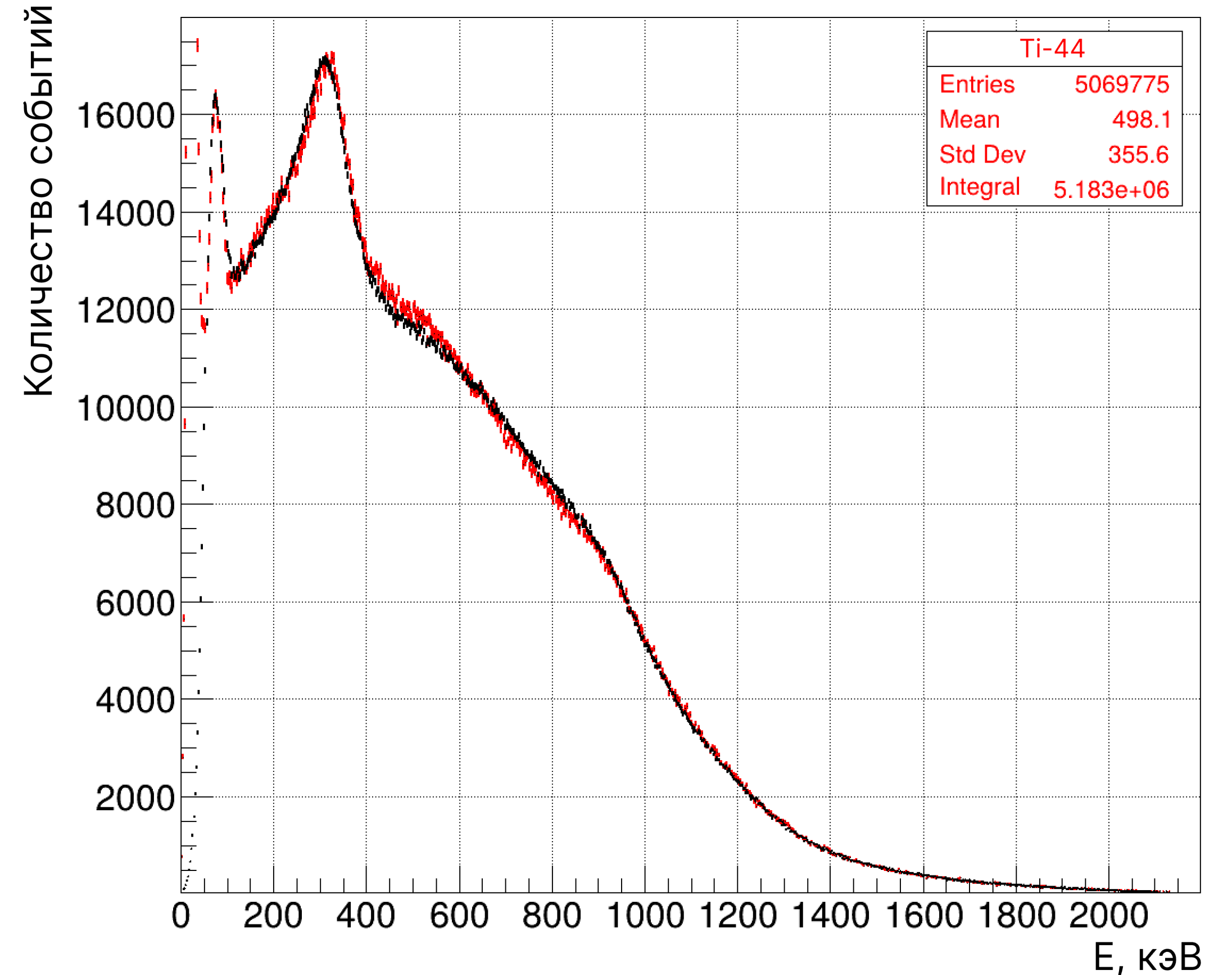


Аппаратурная кривая отклика бета-спектрометра на калибровочные источники Sr-Y-90 и Ti-44.

Калибровка шкалы основного детектора с применением моделирования методом Монте-Карло

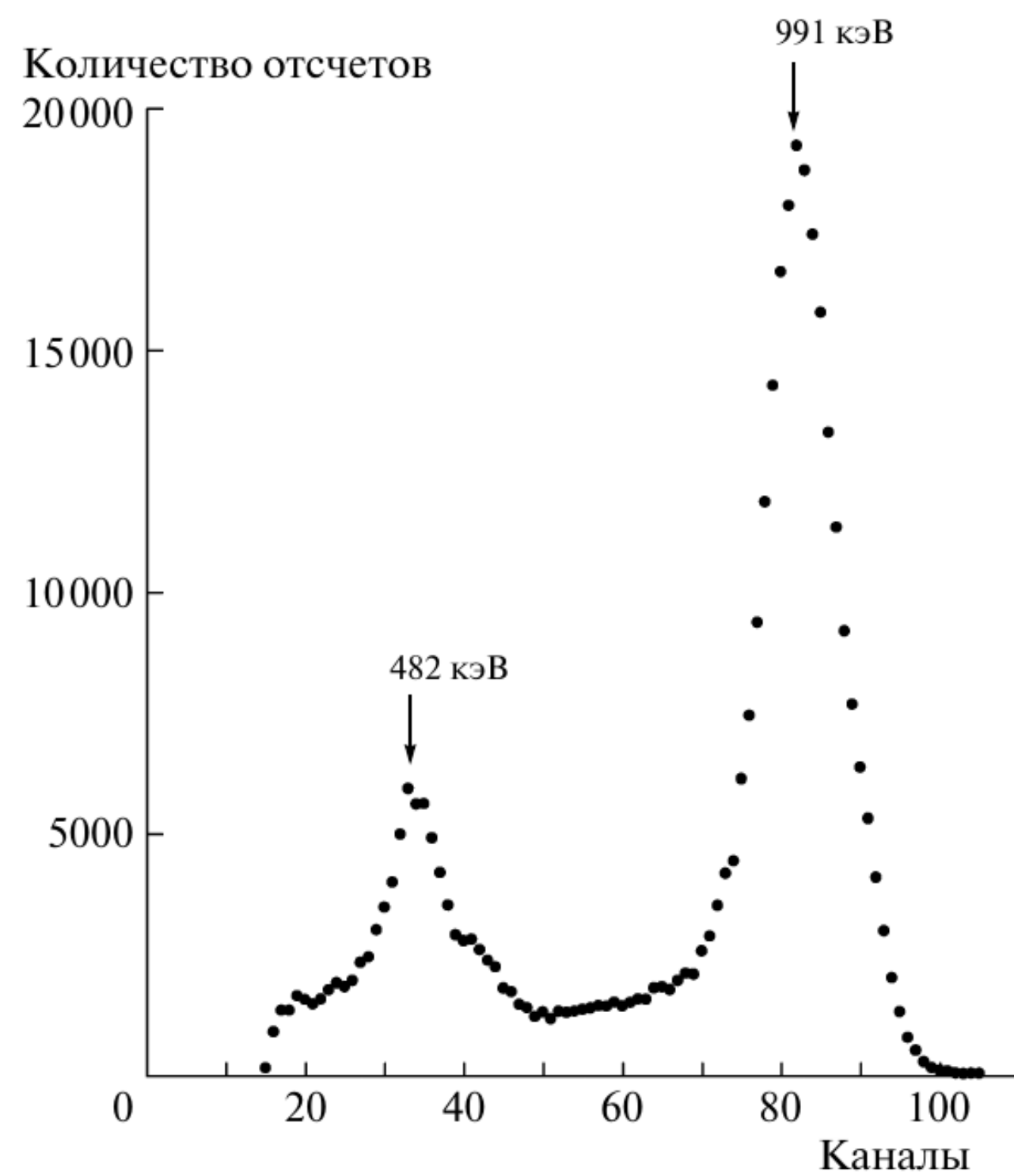


Аппаратурная кривая отклика Е-детектора на калибровочные гамма-источники. Черные точки - результаты моделирования для каждого набора данных.



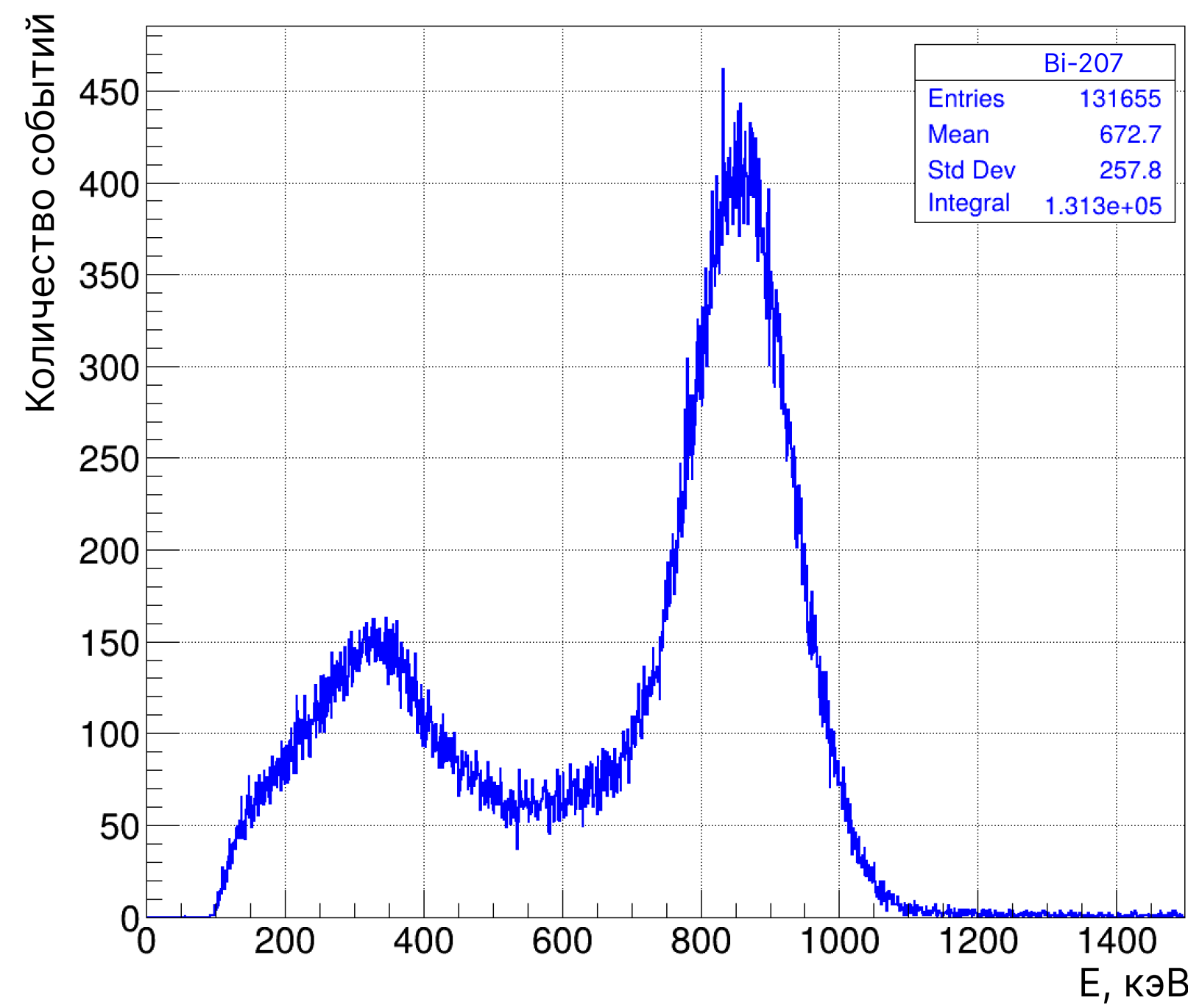
Аппаратурная кривая отклика бета-спектрометра на калибровочный источник Ti-44 в энергетических единицах. Черные точки - результаты моделирования для каждого набора данных.

Экспериментальные данные с калибровочным источником Bi и сравнение с результатами других работ

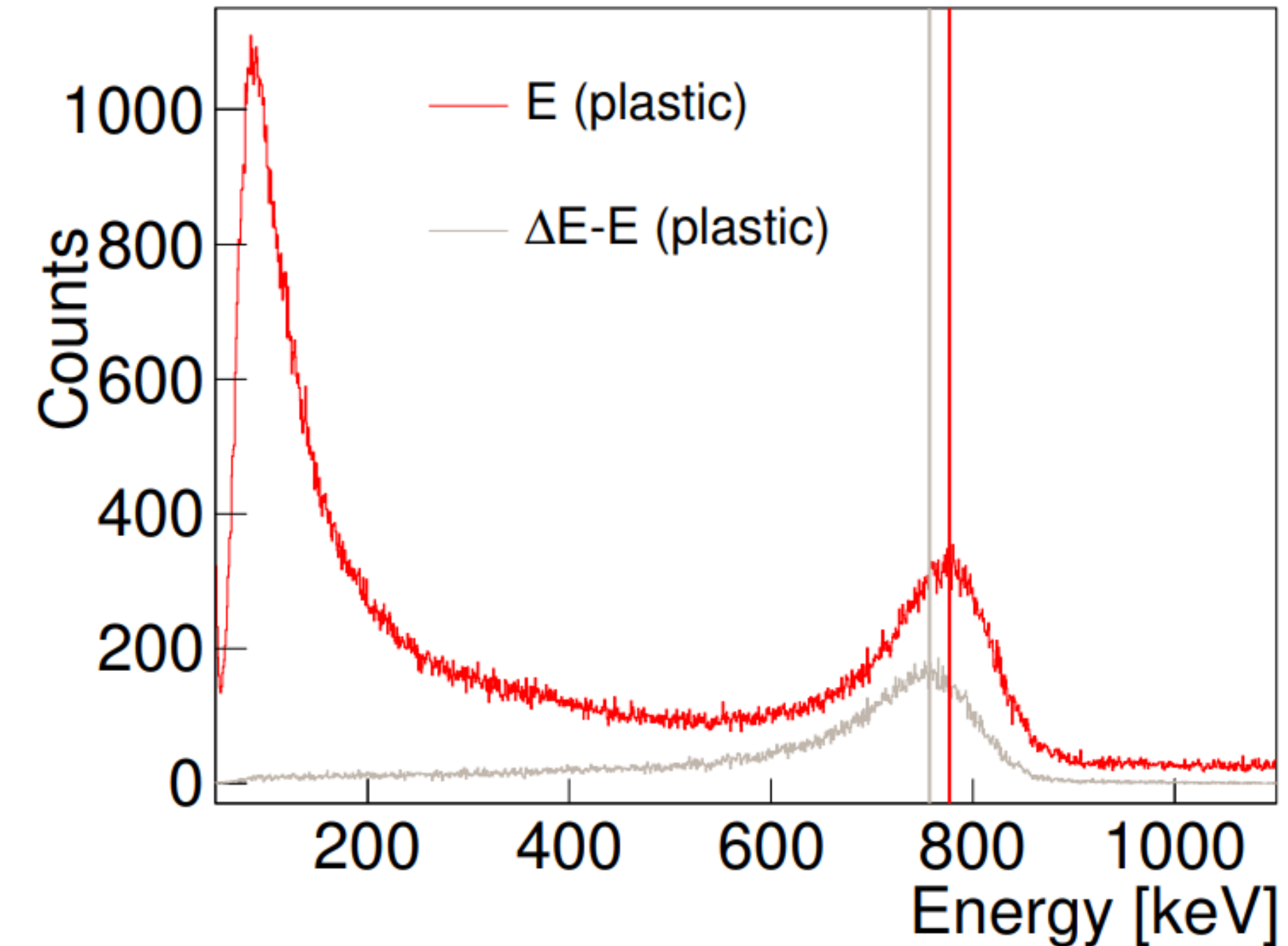


Спектр электронов конверсии от источника Bi-207. Энергии пиков 991 и 482 кэВ даны без поправки на потери в воздухе и пленках. Энергетическое разрешение на 1 МэВ ~ 12%.

Высокоселективный спектрометр бета-частиц / В. А. Апалин, К. А. Балыгин, В. И. Зайцев [и др.] // Приборы и техника эксперимента. 2012. № 1. С. 28.



Аппаратурная кривая отклика бета-спектрометра на источник Bi-207 в энергетических единицах. Результат представляемой работы. Энергетическое разрешение на 1 МэВ ~ 22%.

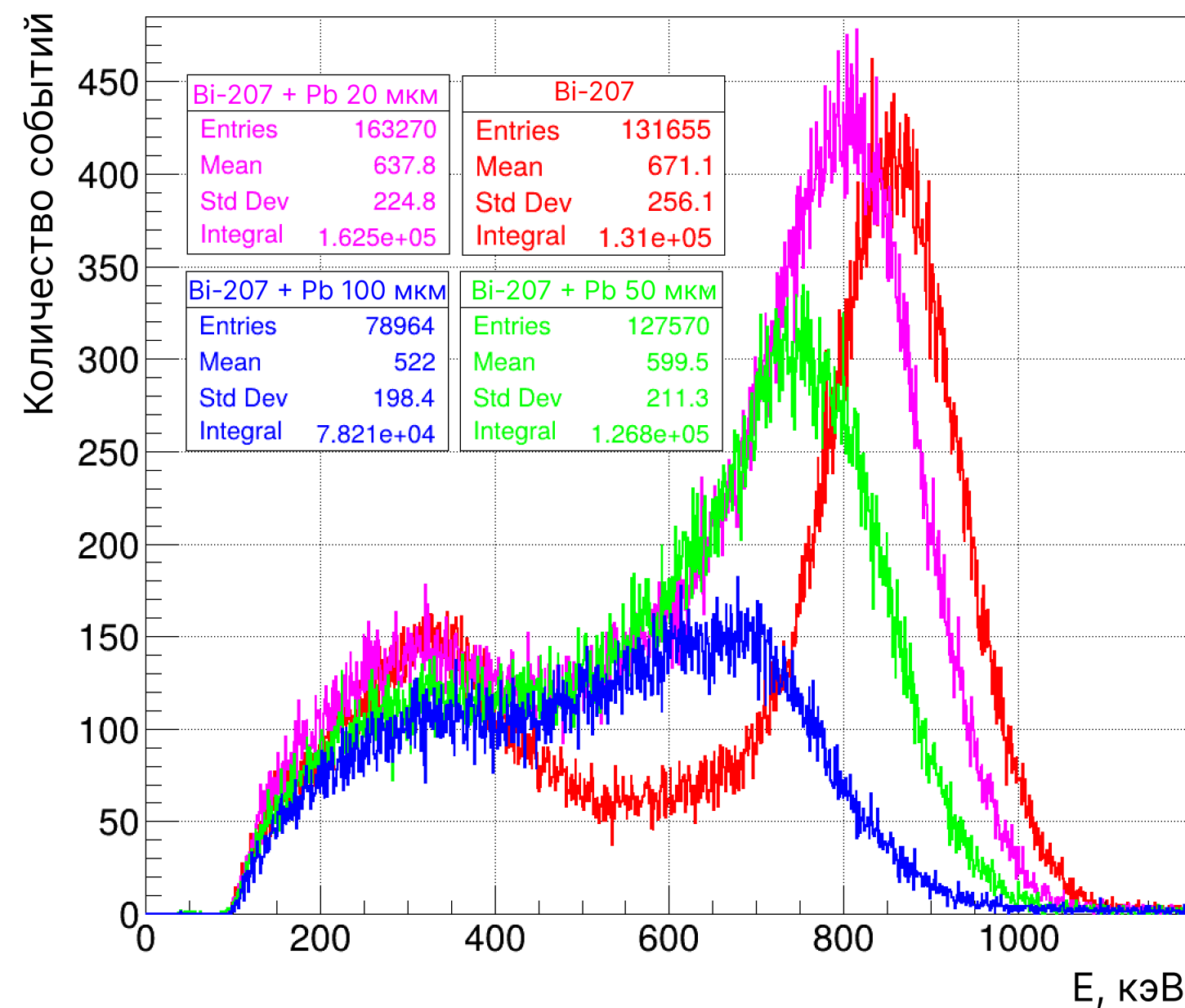


Экспериментальный спектр электронов от источника Bi-207 с энергией 1 МэВ: красный цвет - без совпадений, серый - по совпадениям с ΔE-детектором. Энергетическое разрешение на 1 МэВ ~ 15%.

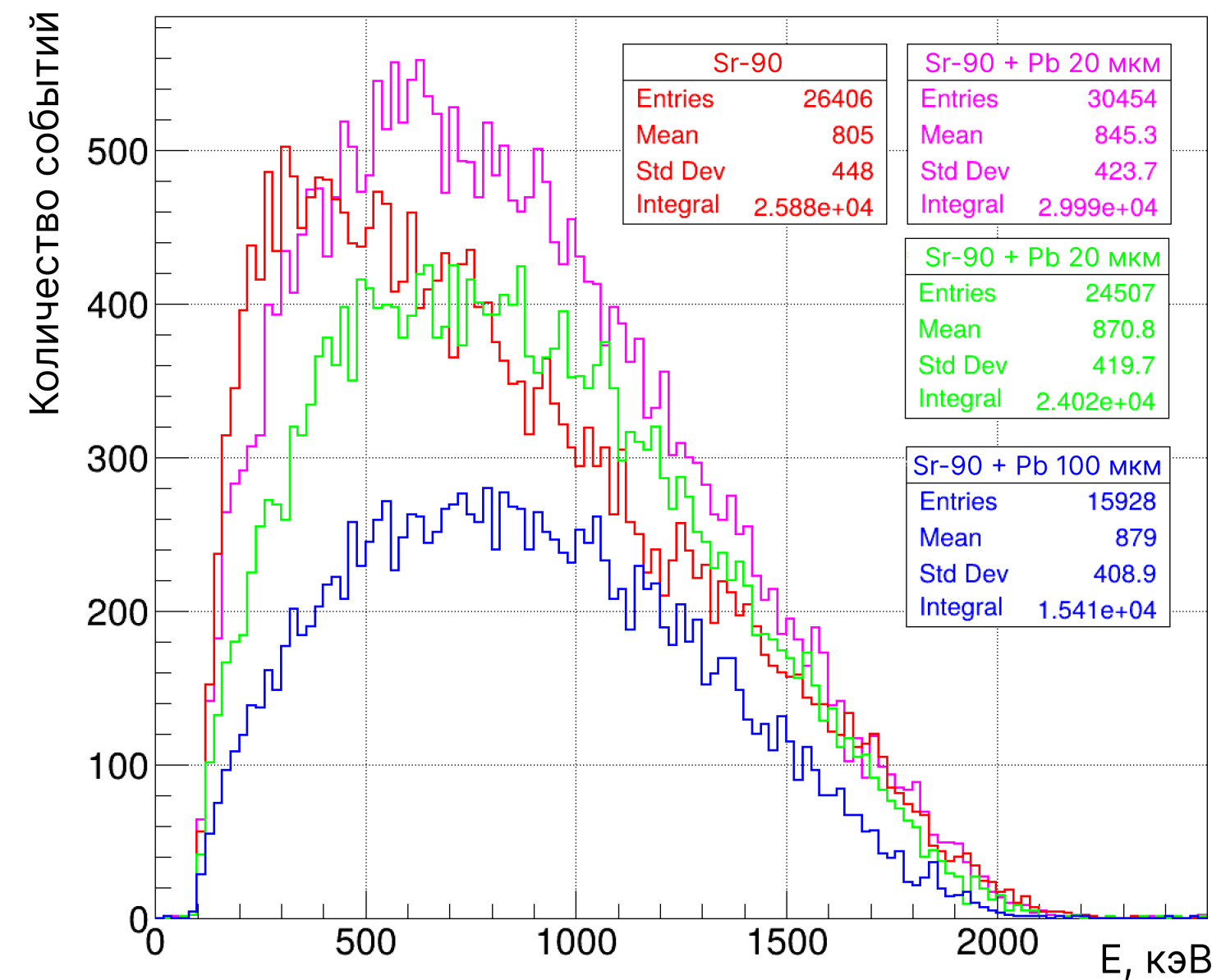
First measurements with a new β-electron detector for spectral shape studies / V. Guadilla [et al.] // Journal of Instrumentation. 2024. Vol. 19, no. 2. P02027

Экспериментальные данные с источниками и тонкими фольгами

С использованием тонких свинцовых фольг:

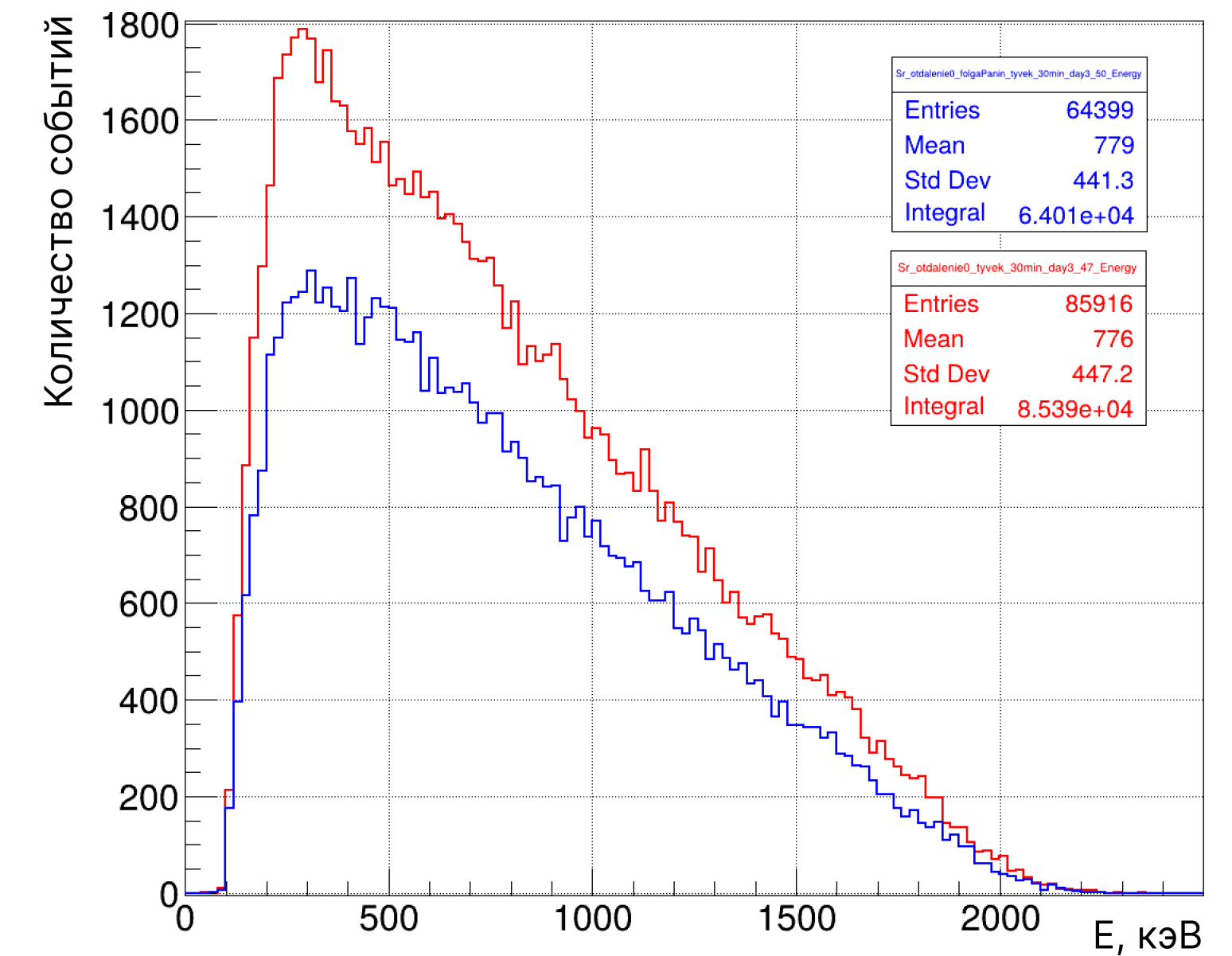


Аппаратурная кривая отклика бета-спектрометра на источник Bi-207 (с и без свинцовых фольг) в энергетических единицах.



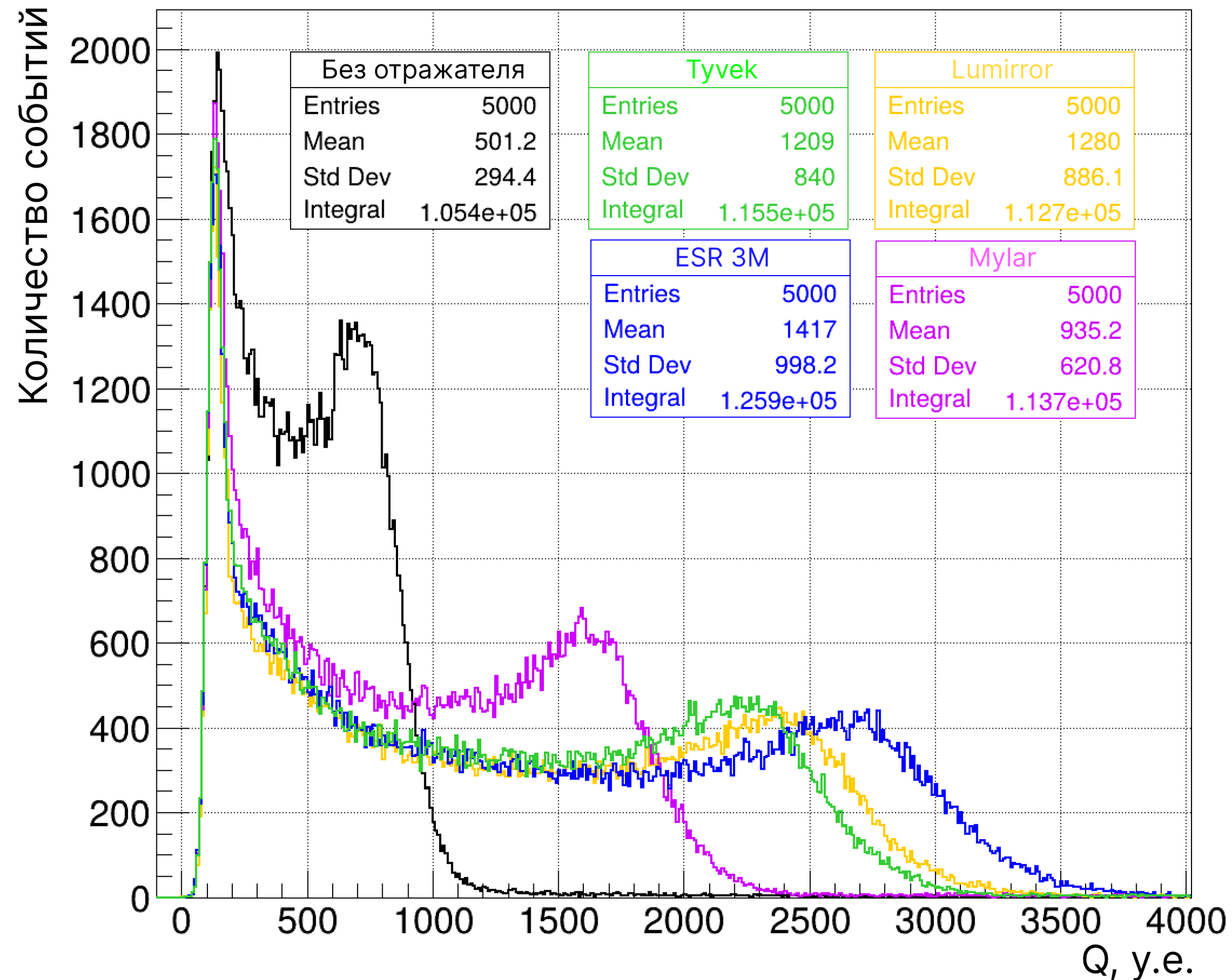
Аппаратурная кривая отклика бета-спектрометра на источник Sr-Y-90 (с и без свинцовых фольг) в энергетических единицах.

С использованием алюминизированного полиэтилена (фольга, в которую завернуты мишени из урана и плутония на установке БЕТА)



Аппаратурная кривая отклика бета-спектрометра на источник Sr-Y-90 (с и без алюминизированного полиэтилена) в энергетических единицах.

Определение лучшего отражателя для сцинтилляторов в детектирующей системе



Аппаратурная кривая отклика Е-детектора на источник Cs-137. Сцинтиллятор Е-детектора обернут в разные светоотражатели.

При исследовании использовались следующие отражатели:

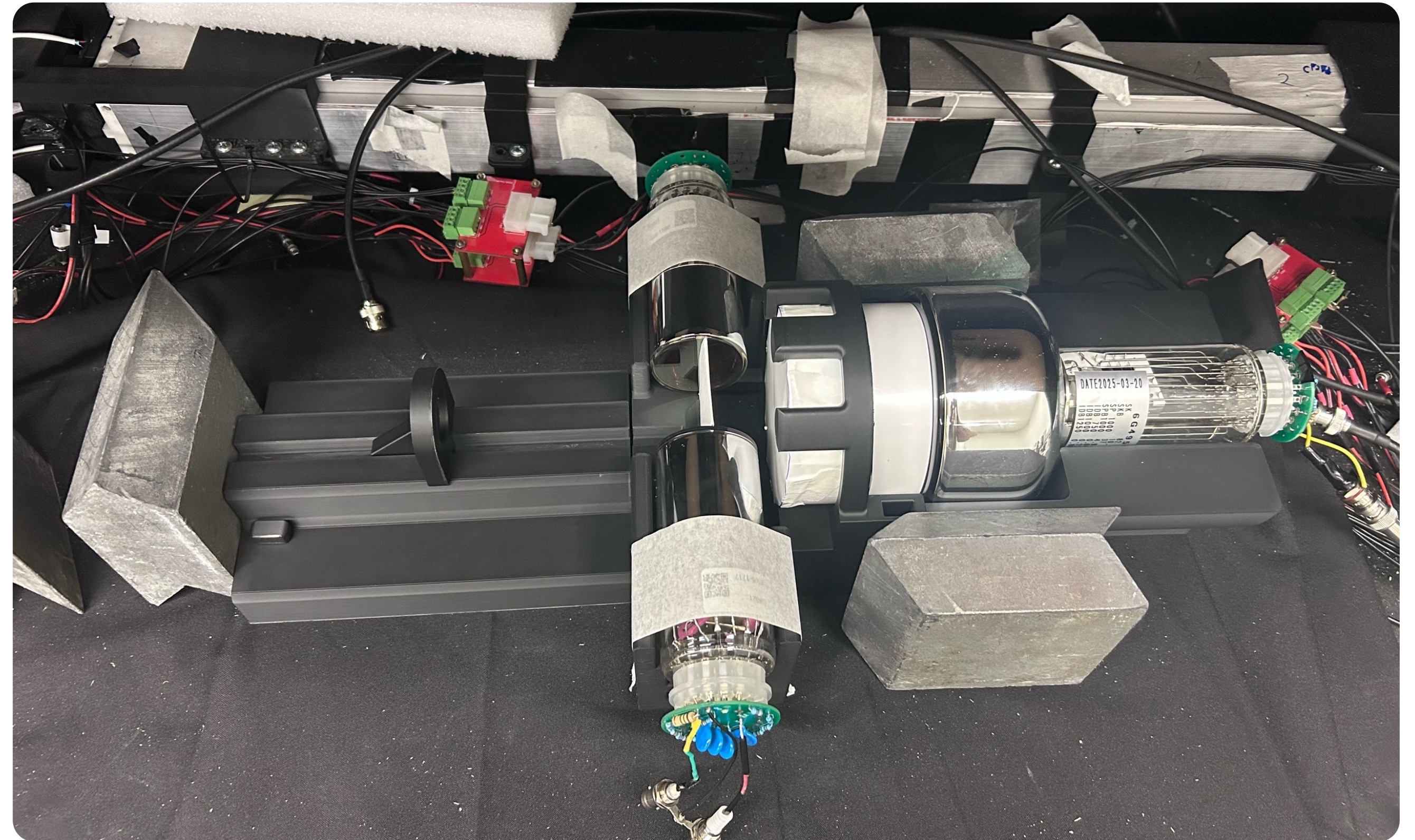
1. **Tyvek** – диффузный светоотражатель (толщина 275 мкм).
2. **Mylar** – зеркальный светоотражатель (толщина 71 мкм).
3. **Lumirror** – комбинация из диффузного светоотражателя и зеркального. (толщина 192 мкм). Используется в экспериментах iDREAM и DarkSide 20k.
4. **ESR 3M** (Enhanced Specular Reflector) – зеркальный светоотражатель (толщина 68 мкм). Используется в экспериментах RED-100 и JUNO.

Сборка с ФЭУ Beijing Hamamatsu CR-165

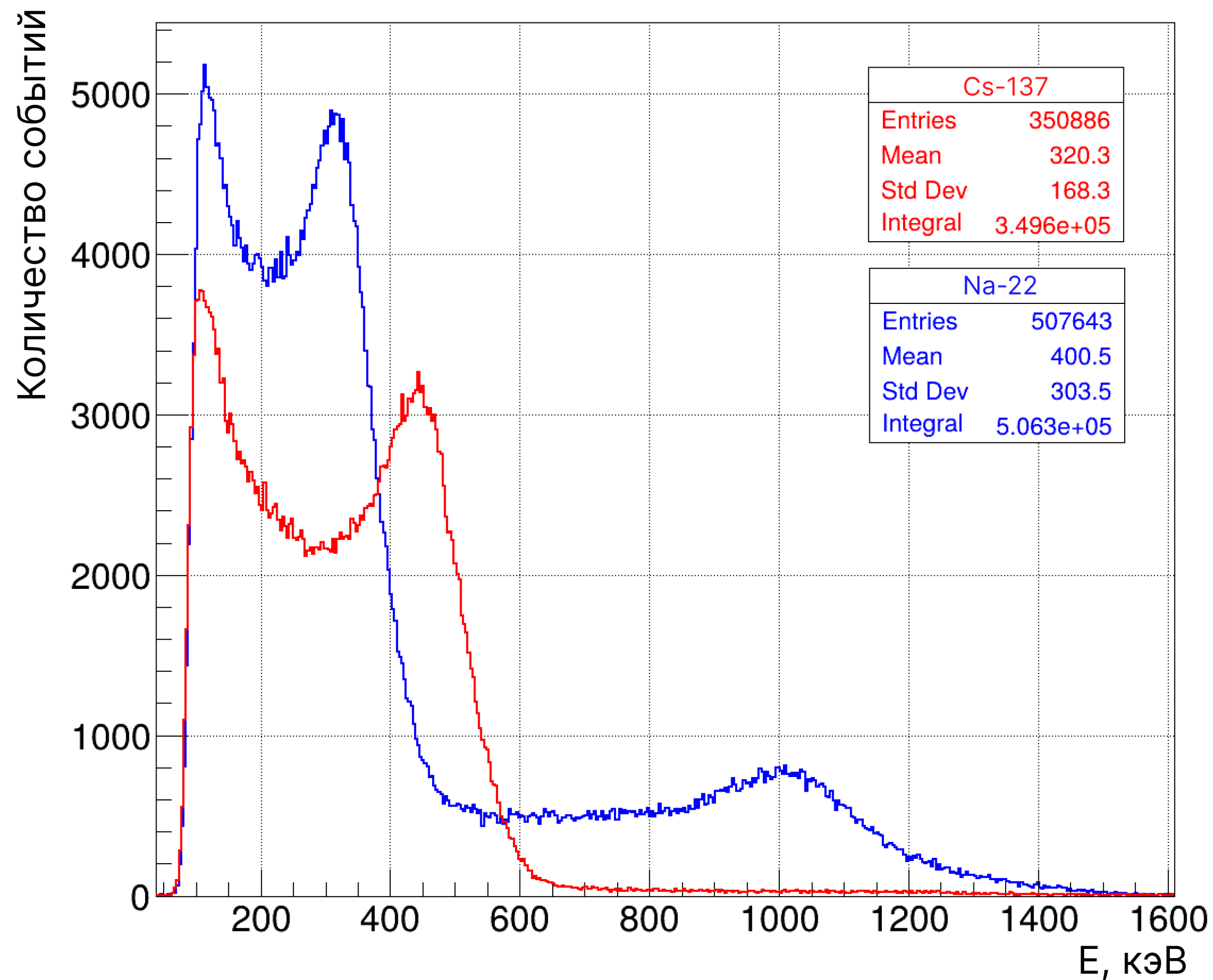
Основные изменения в детектирующей системе, относительно предыдущей сборки:

Е-детектор состоит из:

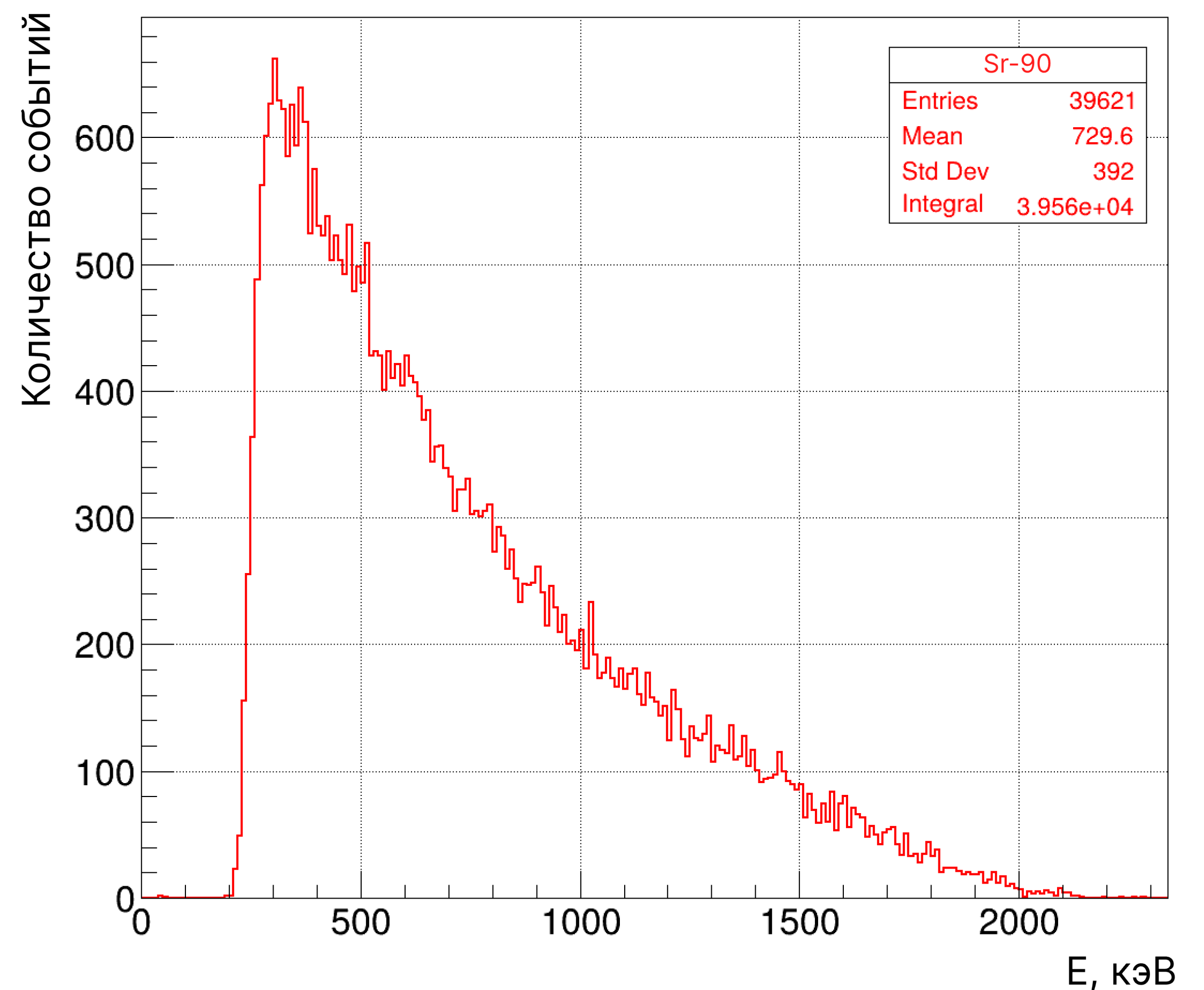
1. Пластикового сцинтиллятора, представляющего собой смесь из полистирола, р-терфина и ПОПОП, в виде цилиндра длиной 6.5 см и диаметром 10 см, плотностью 1.03 гр/см^3 .
2. ФЭУ Beijing Hamamatsu CR-165 с эффективным диаметром фотокатода 10 см.
3. В первых измерениях основной сцинтиллятор был обернут в светоотражатель Lumirror.



Первые экспериментальные данные с новой сборкой детектирующей системы



Аппаратурная кривая отклика E-детектора на источники гамма-излучения Na-22 и Cs-137 в энергетических единицах.



Аппаратурная кривая отклика бета-спектрометра на источник Sr-Y-90 в энергетических единицах.

Заключение

- Для прототипа сцинтилляционного бета-спектрометра измерены аппаратные кривые отклика детектора на набор калибровочных источников гамма- и бета-излучения Cs-137, Na-22, Co-60, Ti-44, Sr-90, Bi-207 (электроны конверсии).
- С использованием моделирования методом Монте-Карло и многопараметрической подгонки проведена калибровка энергетической шкалы E-детектора с помощью гамма-источников.
- Получены энергетические спектры от источника Bi-207 с выделенными конверсионными линиями (482 и 991 кэВ). Энергетическое разрешение для пика 991 кэВ составило ~22%. Проведённое сравнение с одной из работ показало, что полученное разрешение больше значения 12%. Это различие объясняется как минимум использованием в указанной работе сцинтиллятора из стильбена с более высоким световыходом и оптической примазки.
- В серии экспериментов с тонкими свинцовыми фольгами (20, 50, 100 мкм) и с фольгой из алюминизированного полиэтилена выявлено значительное искажение формы спектра бета-частиц: наблюдается смещение спектра, уширение пиков и уменьшение полного числа зарегистрированных событий. Данное искажение спектра обусловлено "разбрызгиванием" - явлением, при котором фольга, перекрывающая точечный источник, сама становится источником электронов за счёт их многократного рассеяния в ней.
- По результатам сравнительных измерений с четырьмя типами светоотражателей (Tyvek, Mylar, Lumirror, ESR 3M) для основного сцинтиллятора выбран отражатель ESR 3M, обеспечивающий наилучший светосбор. Для тонкого пролётного сцинтиллятора сохраняется использование Tyvek как оптимального диффузного светоотражателя.
- Собрана и протестирована новая детектирующая система будущей установки БЕТА-2 с увеличенным основным сцинтиллятором (диаметр 10 см, толщина 6.5 см) и новым ФЭУ Beijing Hamamatsu CR-165. Получены первые экспериментальные спектры от калибровочных источников Cs-137, Na-22, Sr-90.

**Спасибо
за внимание!**

Доп. слайды: Измерение спектрометрических характеристик ФЭУ

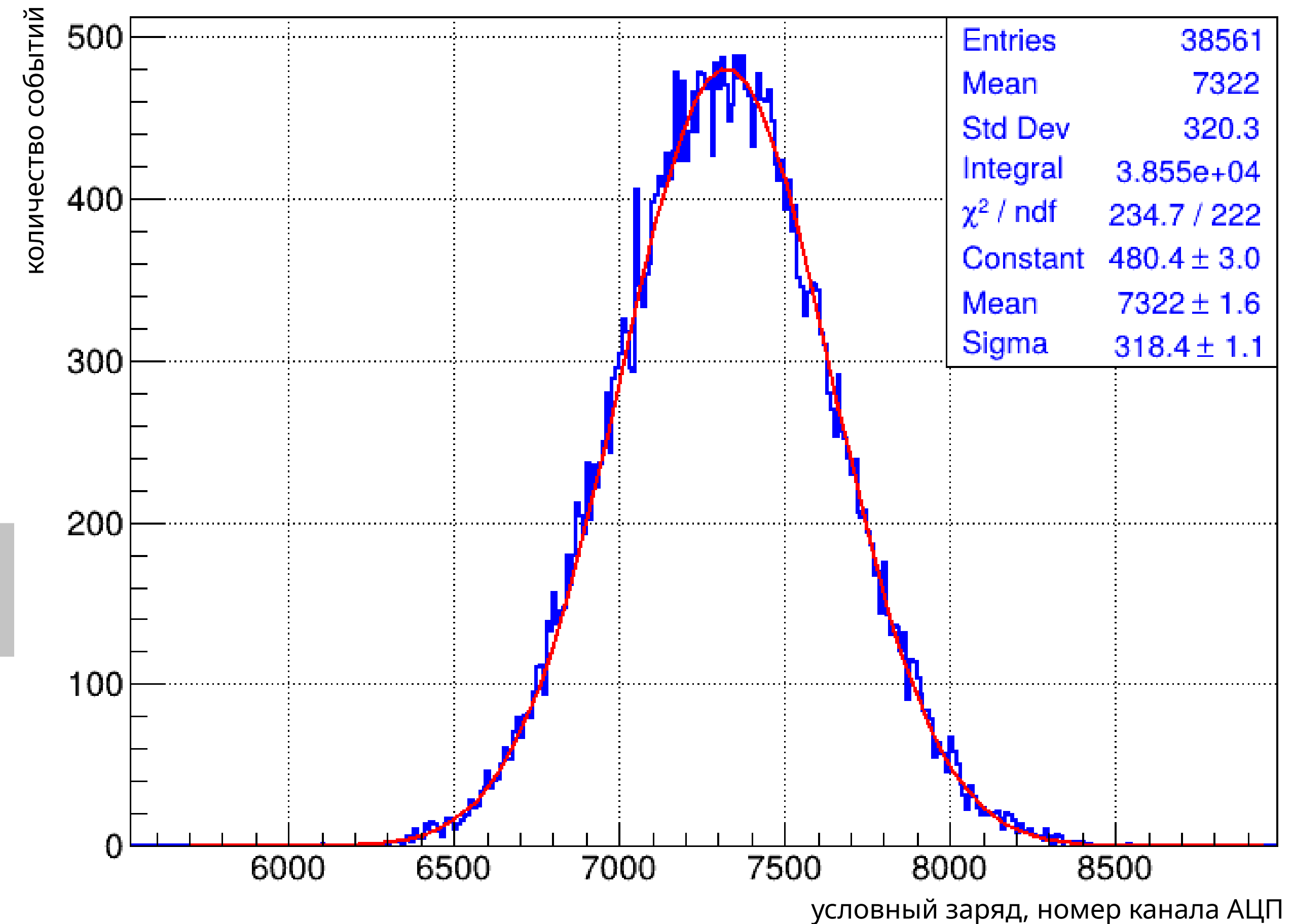
Необходимо:

определить область линейности сигналов и
рабочий диапазон напряжений.

Черный ящик



Схема собранной установки, предназначенной для
определения рабочих параметров ФЭУ.

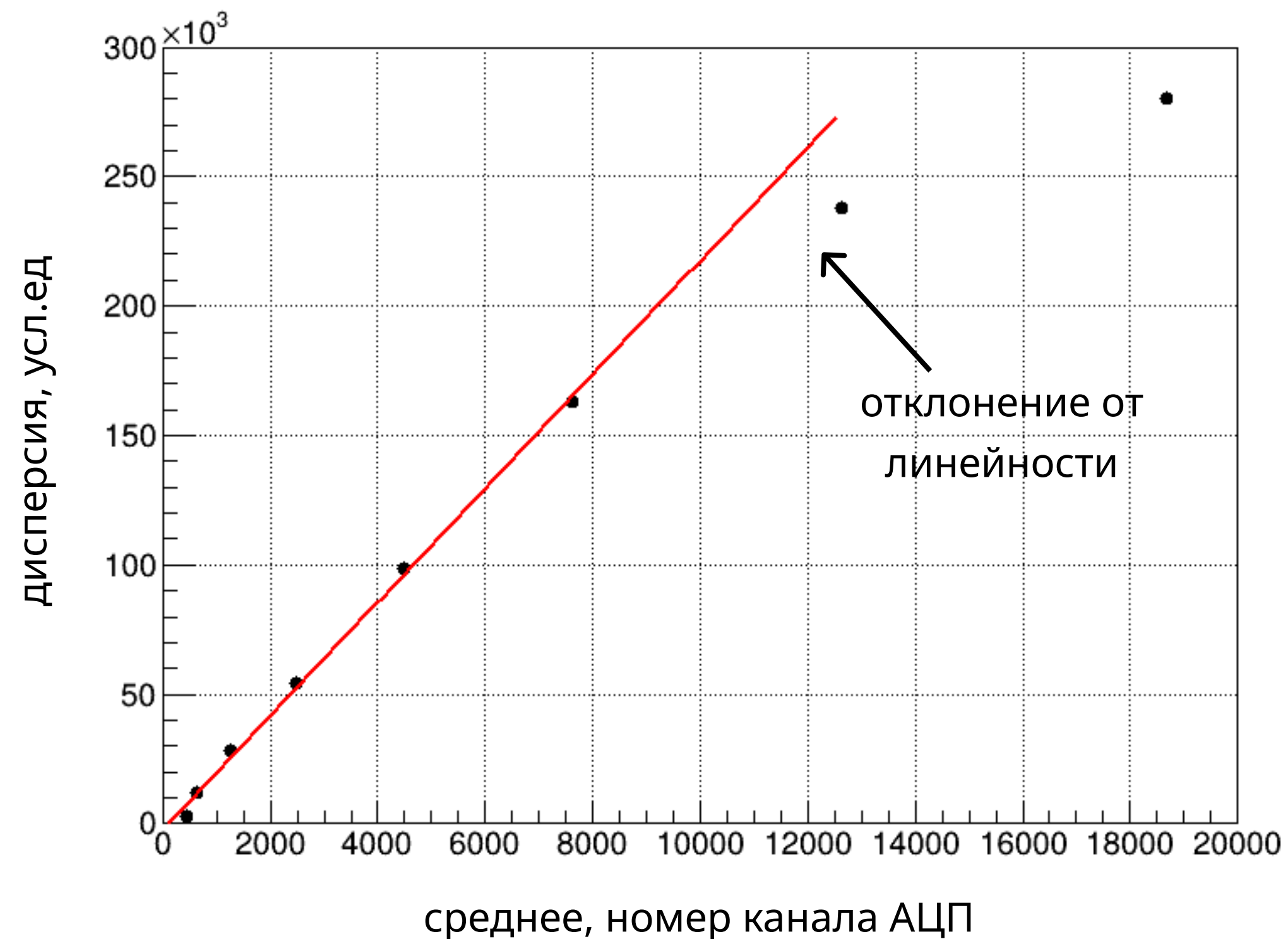


Пример аппаратной кривой отклика ФЭУ на
пучок света.

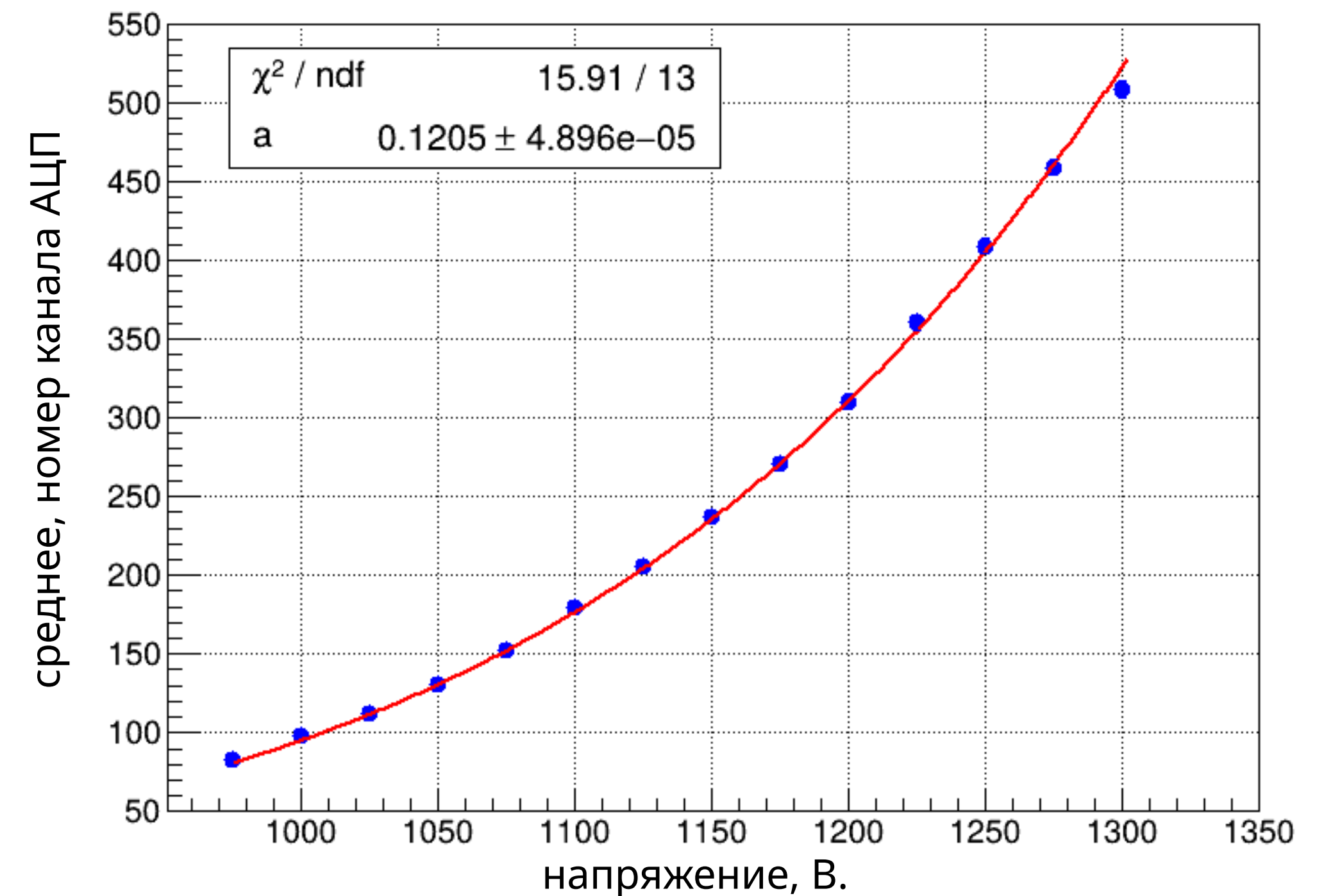
Доп. Слайды: Измерение спектрометрических характеристик ФЭУ

$$\mu = \frac{a^n}{(n+1)^{kn}} \cdot U^{kn}$$

k — эмпирическая постоянная, зависящая от материала фотокатода ФЭУ (принимает значение в диапазоне 0.6–0.9); n — количество динодов (в данной работе $n = 10$); a — свободный параметр.



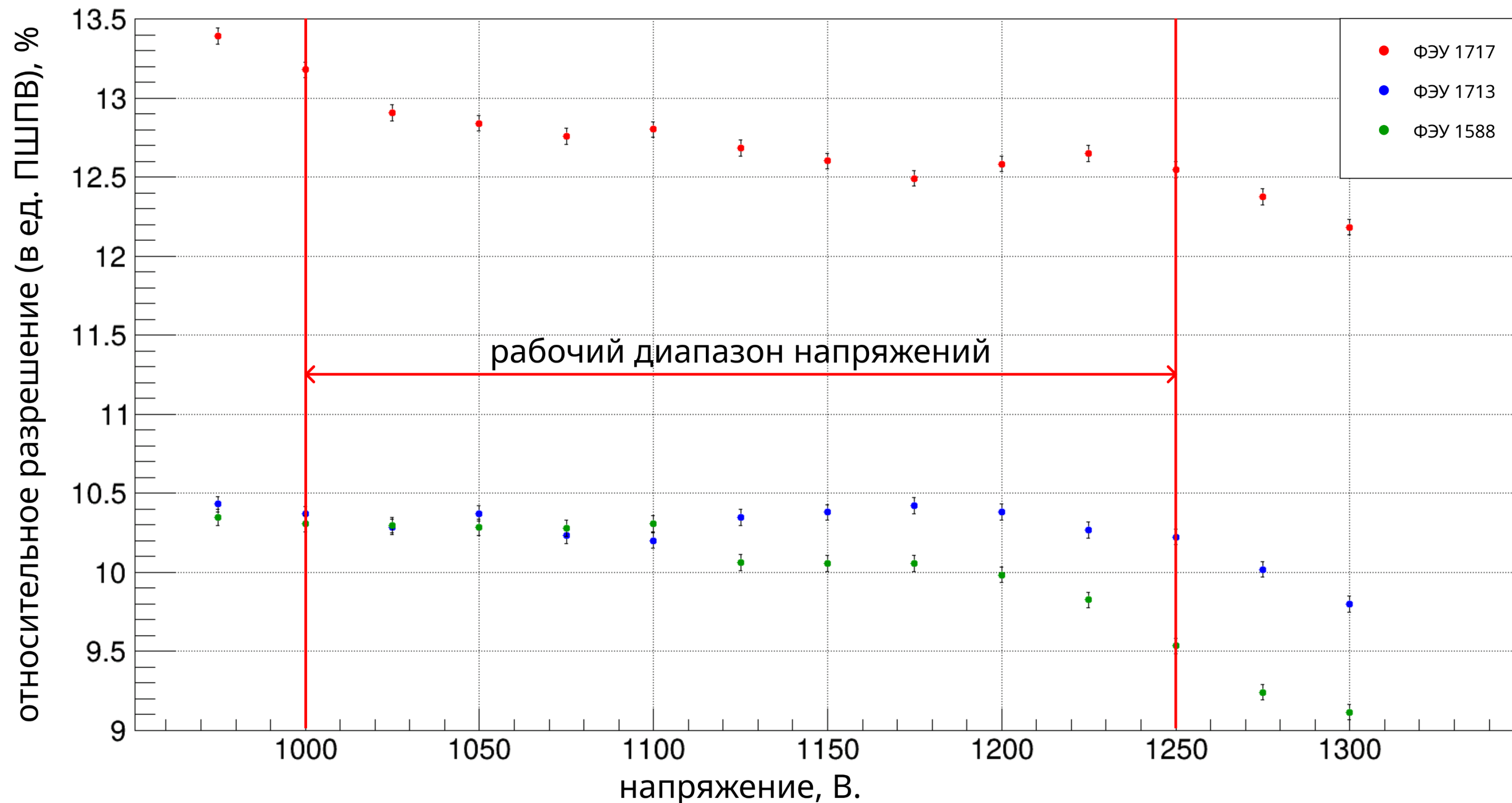
Зависимость дисперсии кривой отклика от ее положения среднего. Красная линия — результат аппроксимации полученной зависимости линейной функцией.



Зависимость положения среднего кривой отклика ФЭУ от подаваемого на него напряжения. Красная кривая - результат аппроксимации данных

Доп. слайды:

Измерение спектрометрических характеристик ФЭУ



Результат:

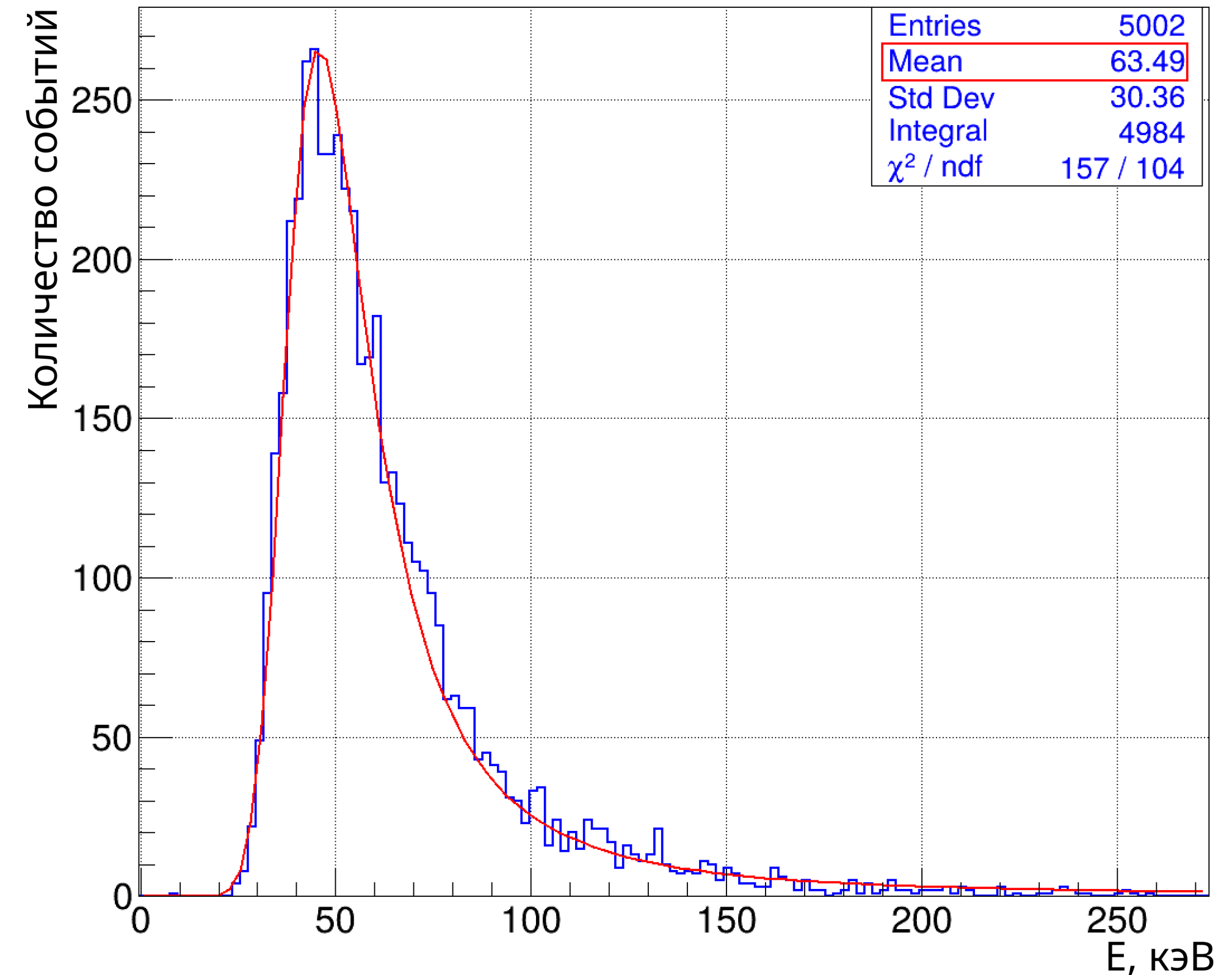
- найдена область линейности сигналов (до 600 мВ).
- определен рабочий диапазон напряжений.
- В эксперименте на ФЭУ-1717 было подано напряжение 1200 В.
- На ФЭУ-1713 и ФЭУ-1588 было подано напряжение 1250 В.

Зависимость относительного разрешения кривой отклика ФЭУ от подаваемого напряжения. Где ФЭУ-1717 расположен рядом с основным сцинтиллятором, а ФЭУ-1713 и ФЭУ-1588 рядом с тонким пролетным сцинтиллятором.

Доп. слайды: Экспериментальные данные с источником Sr



Аппаратурная кривая отклика детектора на калибровочный источник стронция в энергетических единицах.



Аппаратурная кривая отклика ΔE -детектора на источник Sr в энергетических единицах. Красная кривая - результат аппроксимации данных сверткой функций Ландау и Гаусса.

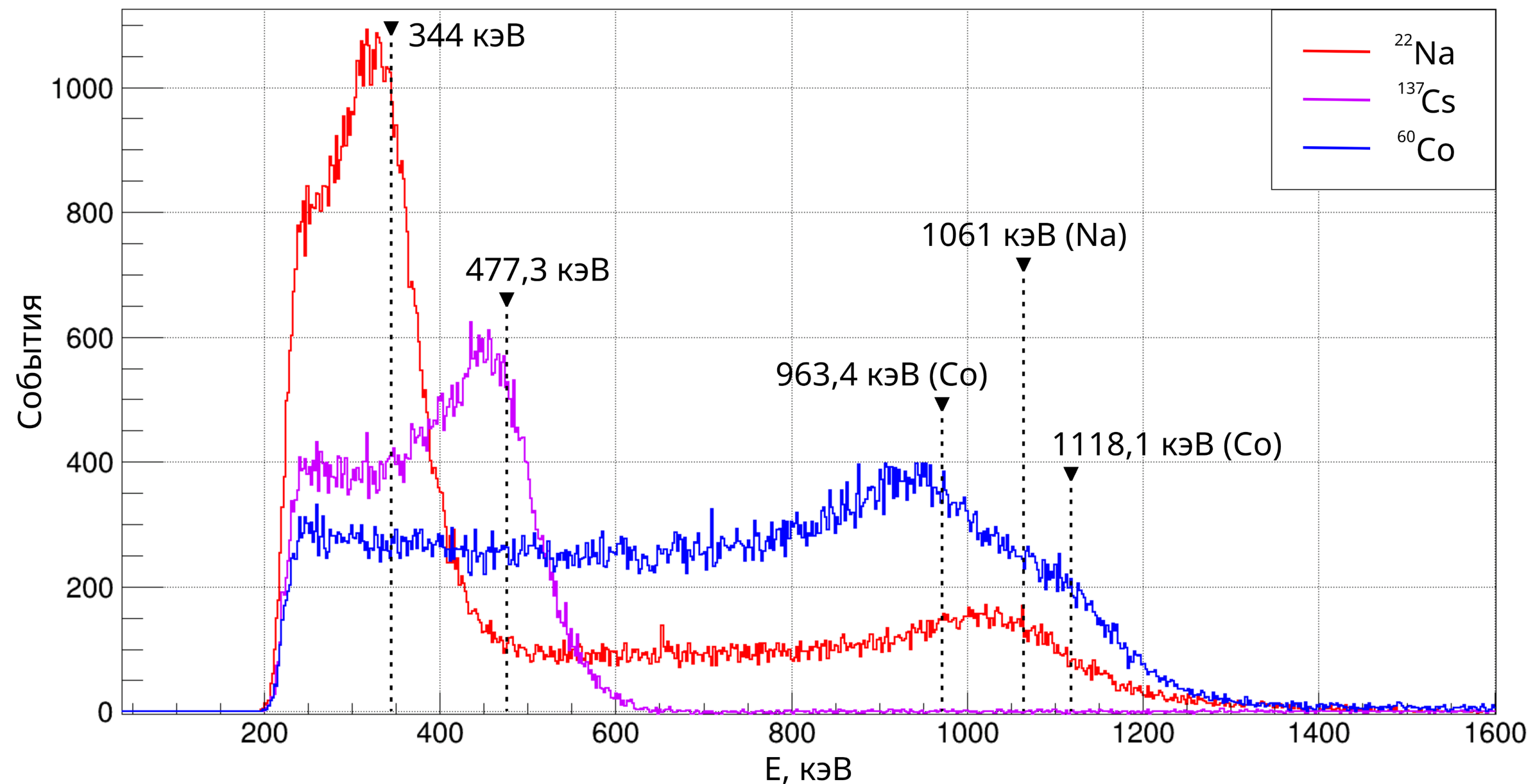
Доп.слайды: Калибровка шкалы E-детектора

Положение края рассчитывается по формуле:

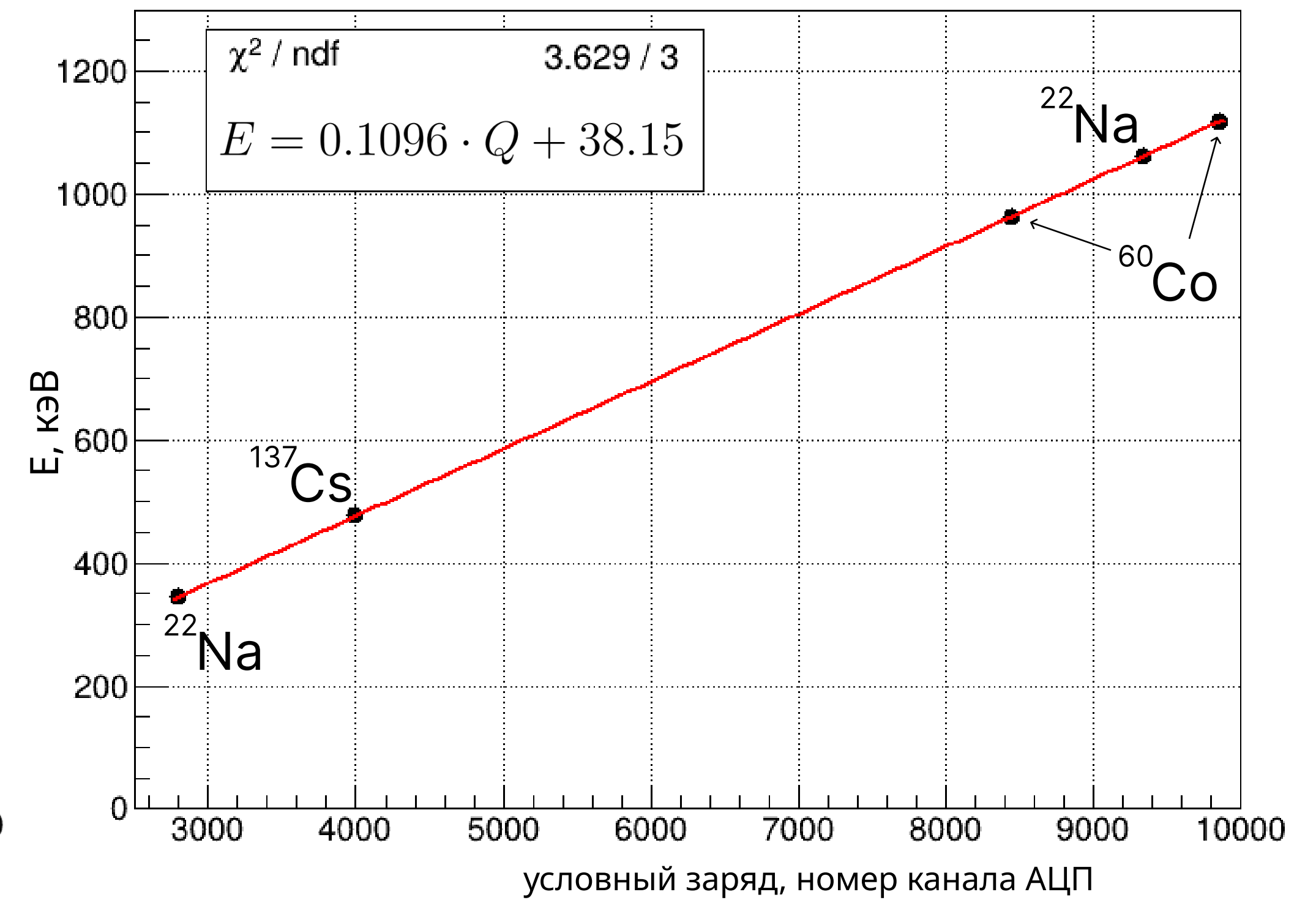
$$Q = \mu + \frac{\sigma}{2}$$

где μ – математическое ожидание распределения заряда сигналов.

σ – стандартное отклонение распределения заряда сигналов.



Аппаратурные кривые отклика E-детектора на калибровочные источники в энергетических единицах.



Зависимость энергетической шкалы от условного заряда.