



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Выпускная квалификационная работа бакалавра:
**Разработка сцинтилляционного
спектрометра для
детектирования реакторных
антинейтрино**

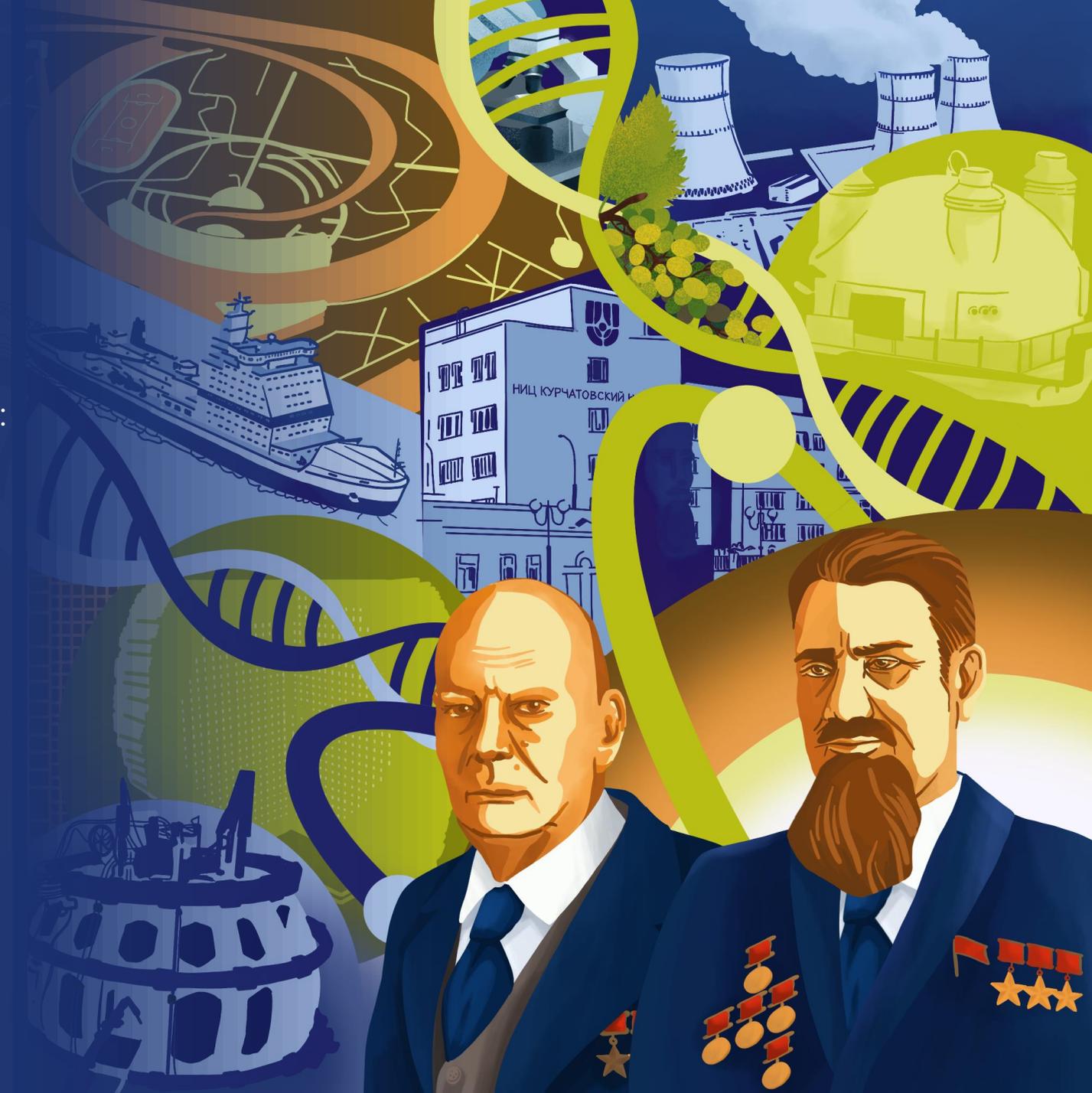
Научный руководитель: Д.В. Попов^{1,2}

Исполнитель: Р.Р. Биктимиров^{1,2,*}

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

*Biktimirov_RR@nrcki.ru





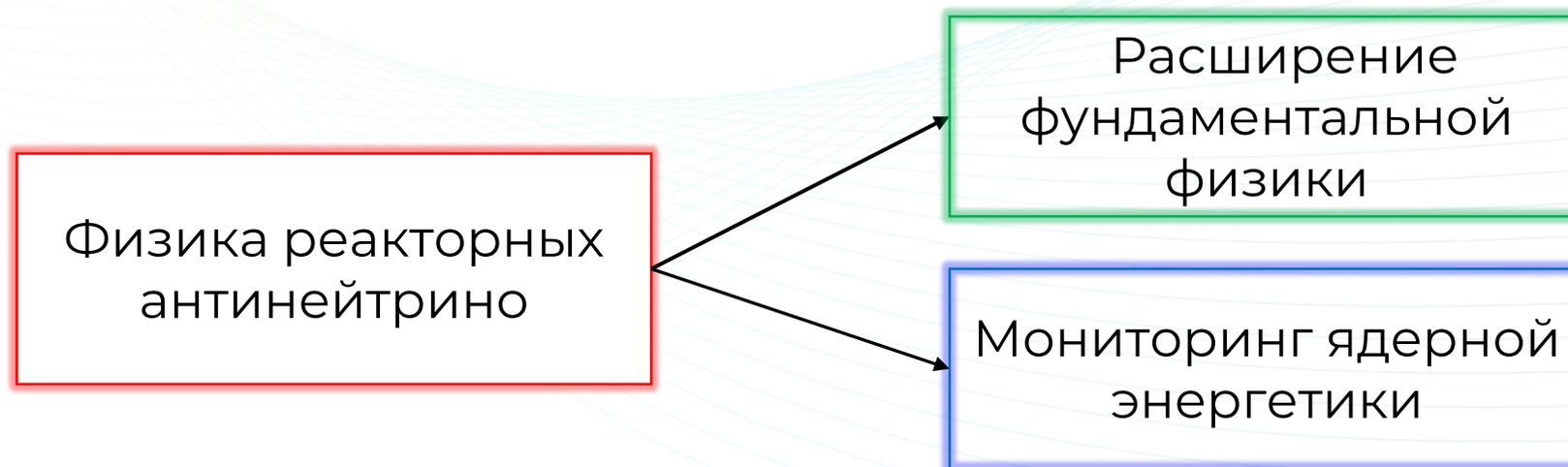
Цель:

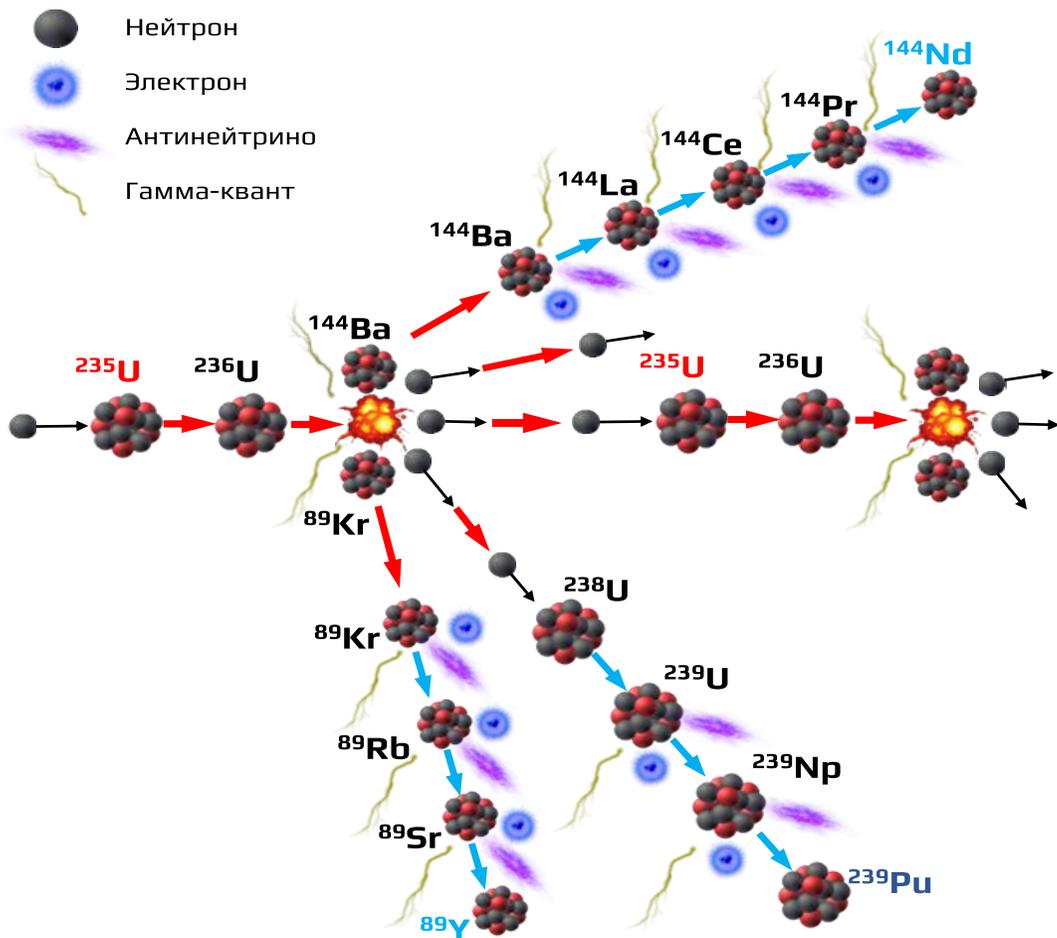
Разработка сцинтилляционного спектрометра для детектирования реакторных антинейтрино.

Задачи:

- Определение спектрометрических характеристик и сравнение по ним между собой пластиковых сцинтилляторов;
- Определение спектрометрических характеристик и сравнение по ним между собой вакуумных ФЭУ;
- Подбор оптимальной конфигурации блока модульного детектора реакторных антинейтрино.

- Фундаментальные исследования: исследование нейтринных осцилляций, определение иерархии масс нейтрино, поиски новой физики (реакторная антинейтринная аномалия, “bump effect”).
- Прикладное приложение: проведение независимого мониторинга состояния и состава топлива ядерного реактора, определение мощности реактора и дистанционный контроль его энерговыработки.





1 деление:

- выделение энергии ~ 200 МэВ;
- рождение $\sim 6 \bar{\nu}_e$.

Основной вклад в рождение $\bar{\nu}_e$:

^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu .

Для ядерного реактора мощностью $P = 3$ ГВт:

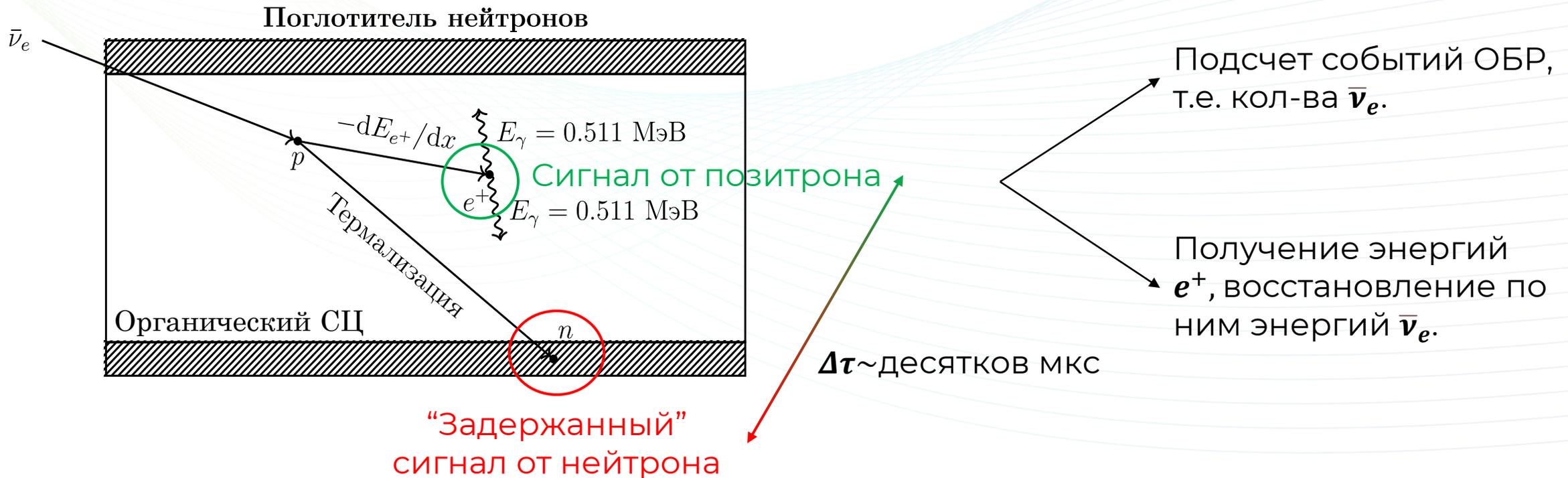
$$N_{\text{делений}} = \frac{3 \text{ ГВт}}{200 \text{ МэВ}} \approx 10^{20} [\text{с}^{-1}] \Rightarrow N_{\nu} \approx 10^{21} [\text{с}^{-1}].$$

Ядерный реактор – самый интенсивный искусственный источник $\bar{\nu}_e$.



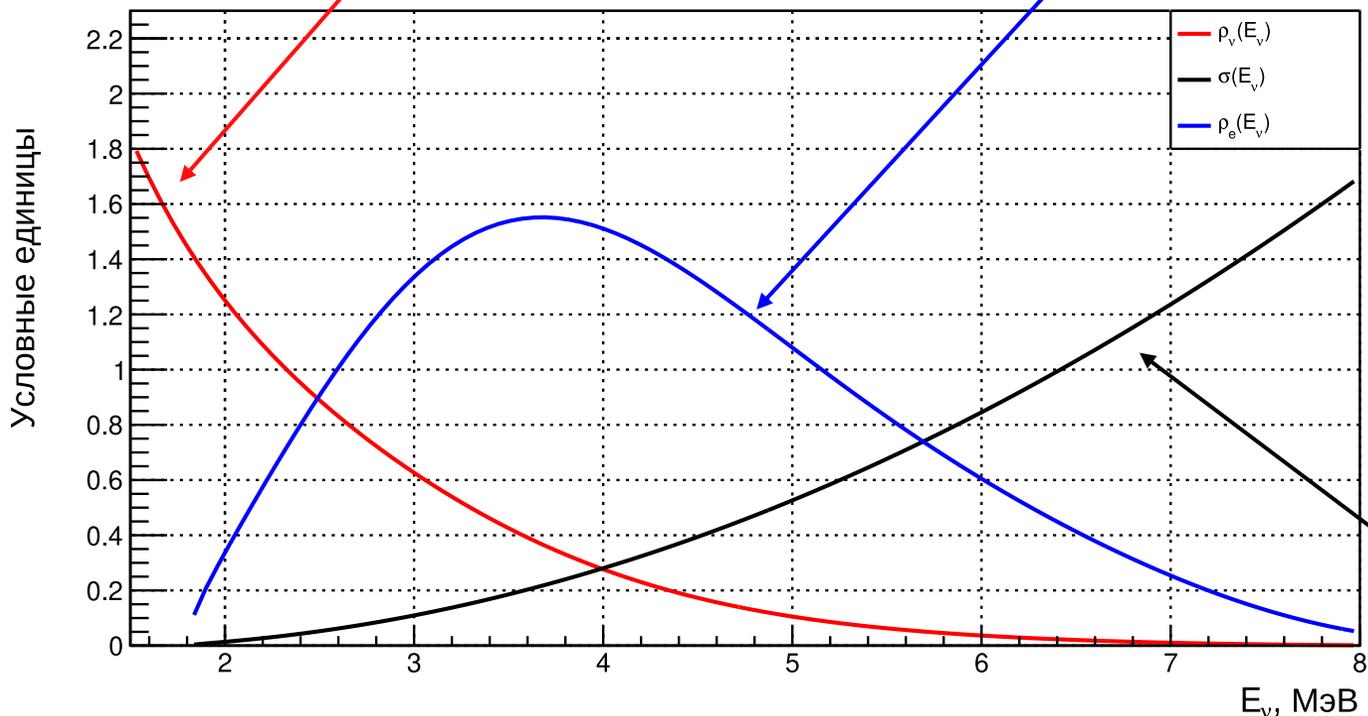
В 1956 г. Райнес и Коуэн экспериментально подтвердили существование нейтрино по реакции **обратного бета-распада (ОБР)** $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$. С 1956 г. и по настоящее время реакция ОБР широко используется в экспериментах по физике реакторных антинейтрино.

Метод задержанный совпадений ОБР:





Кумулятивный спектр антинейтрино Спектр позитронов



Диапазон энергий $\bar{\nu}_e$: от **0** до **8** МэВ.

Порог энергии $\bar{\nu}_e$: $E_{\bar{\nu}_e, \text{порог}} \approx$ **1.803** МэВ.

Связь $E_{\bar{\nu}_e}$ с регистрируемой энергией $E_{\text{рег.}}$:

$$E_{\bar{\nu}_e} \approx E_{\text{рег.}} + \mathbf{0.782 \text{ МэВ.}}$$

$E_{\text{рег.}} = T_{e^+} + 2m_{e^+}$, где T_{e^+} – «потерянная» кинетическая энергия позитрона, m_{e^+} – масса позитрона.

Сечение ОБР: $\sigma \sim \mathbf{10^{-43} \frac{\text{см}^2}{\text{деление}}}$.



Поглотитель нейтронов

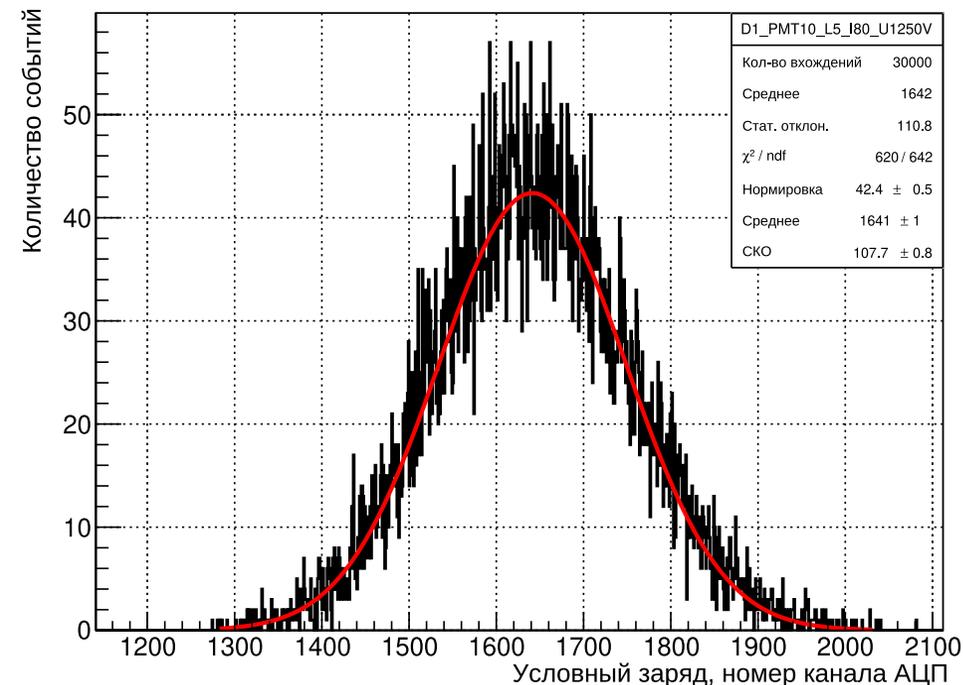
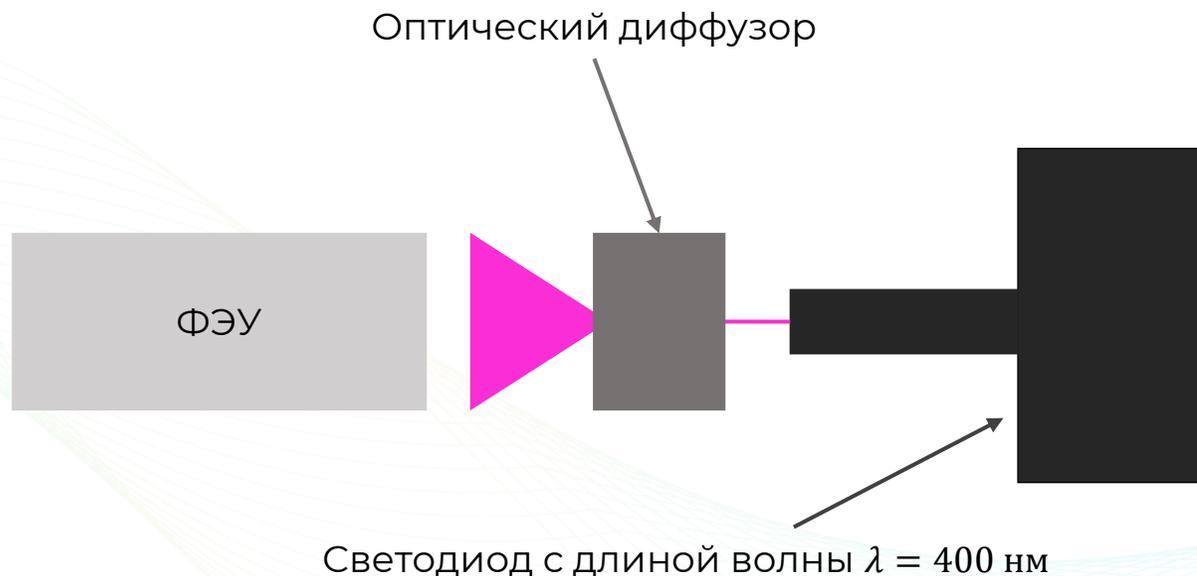


Функциональный вид спектрометра

Спектрометр:

пластиковый сцинтиллятор (полистирол с добавками п-терфенил и ПОПОП) размерами (700 x 50 x 50) мм, сигнал с которого снимается вакуумными ФЭУ с эффективным диаметром фотокатода 46,5 мм.

Блок детектора: сборка из 9 независимых спектрометров.

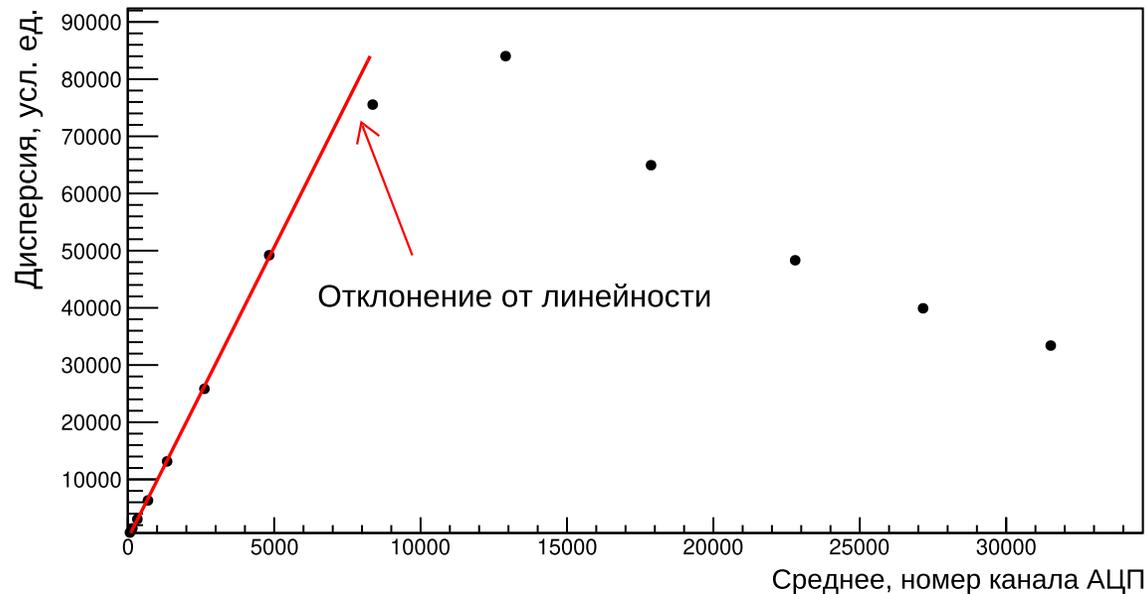


Аппаратурная кривая отклика ФЭУ
(гауссиана)

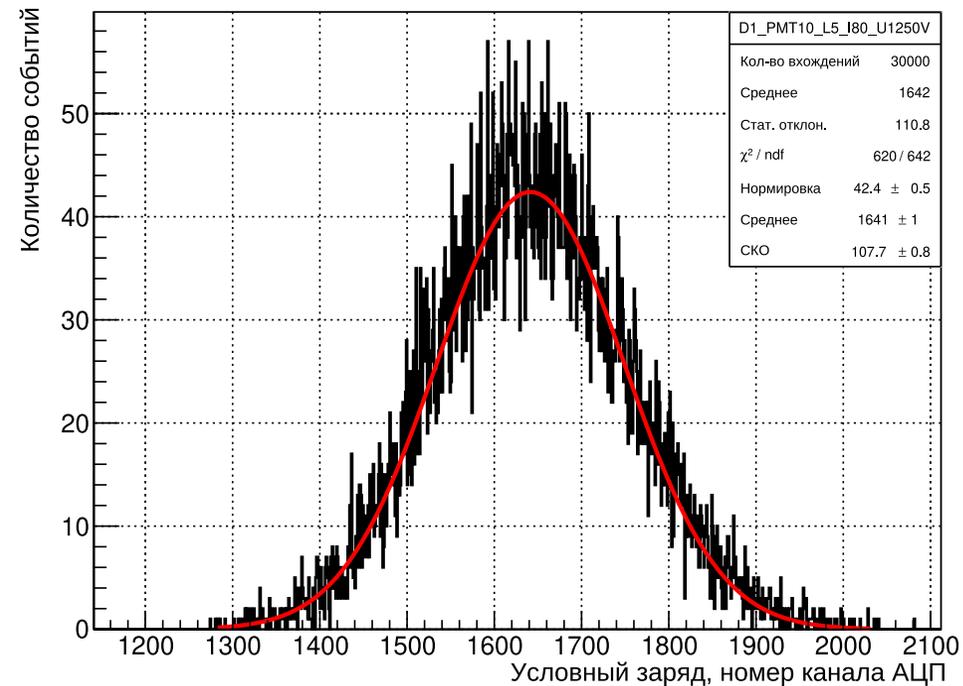
2 серии измерений:

- измерение зависимости отклика 17 ФЭУ от яркости светодиода при постоянном напряжении → **рабочий диапазон амплитуд**;
- измерение зависимости отклика 17 ФЭУ от напряжения при постоянной яркости светодиода → **рабочий диапазон напряжений**.

Насыщение ФЭУ



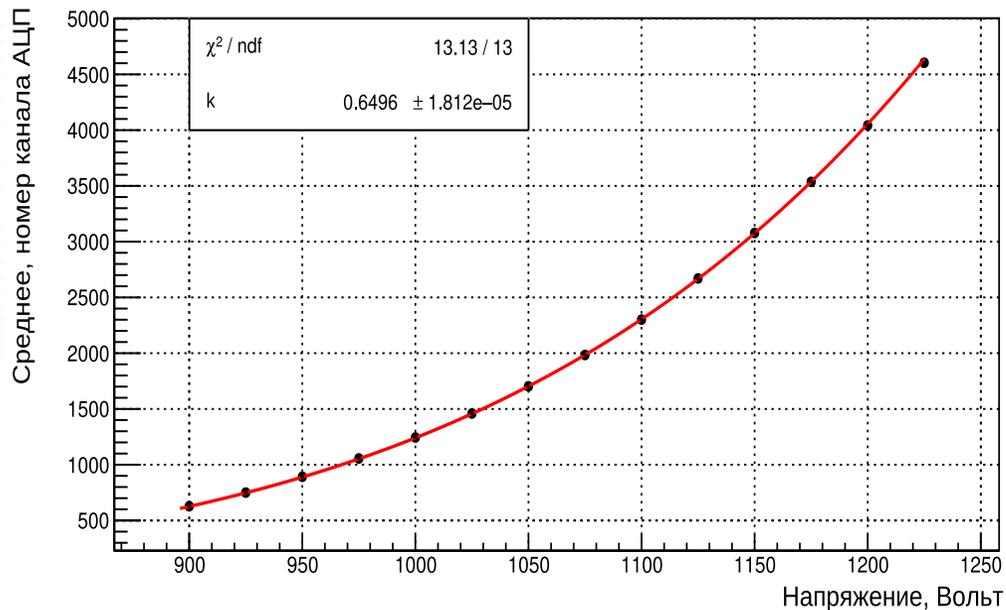
Зависимость дисперсии кривой отклика ФЭУ от среднего.



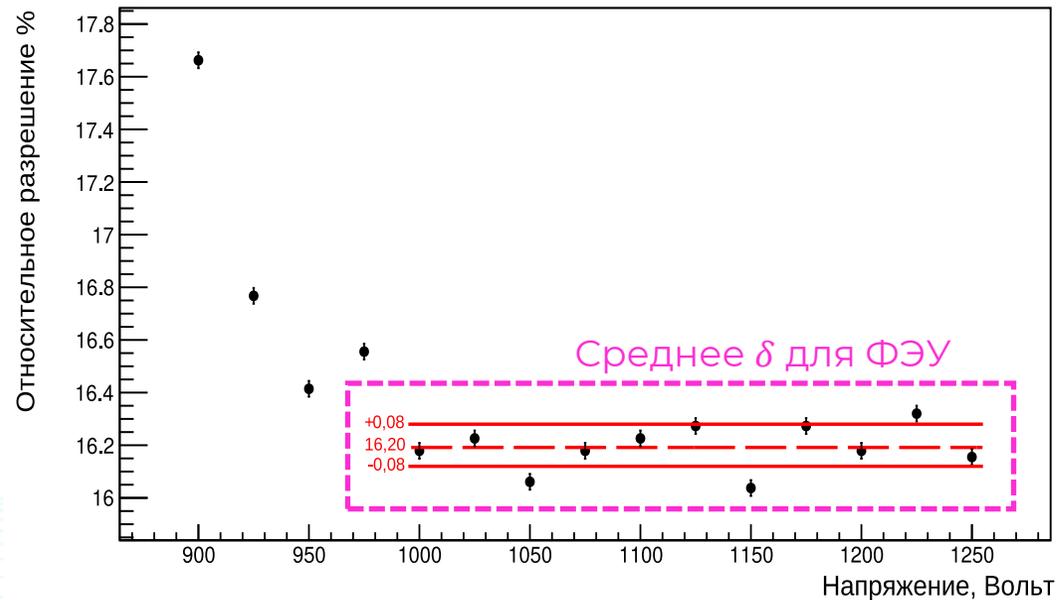
Красная линия – ожидаемая зависимость: $D = k \cdot \mu$, где $D = \sigma^2$ – дисперсия, μ – среднее.

Отклонение от линейности: амплитуды сигналов – 600 мВ ~ 5000 номер канала.

Все дальнейшие измерения проводились в рабочем диапазоне амплитуд



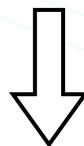
Относительное разрешение (в ед. ПШПВ) от напряжения



Подгонка эмпирическим законом:

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

где μ – среднее кривой отклика ФЭУ,
 U – подаваемое напряжение,
 n – кол-во динодов = 10,
 k – постоянная $\in [0.7 - 0.9]$,
 a – свободный параметр.



Относительное разрешение δ :

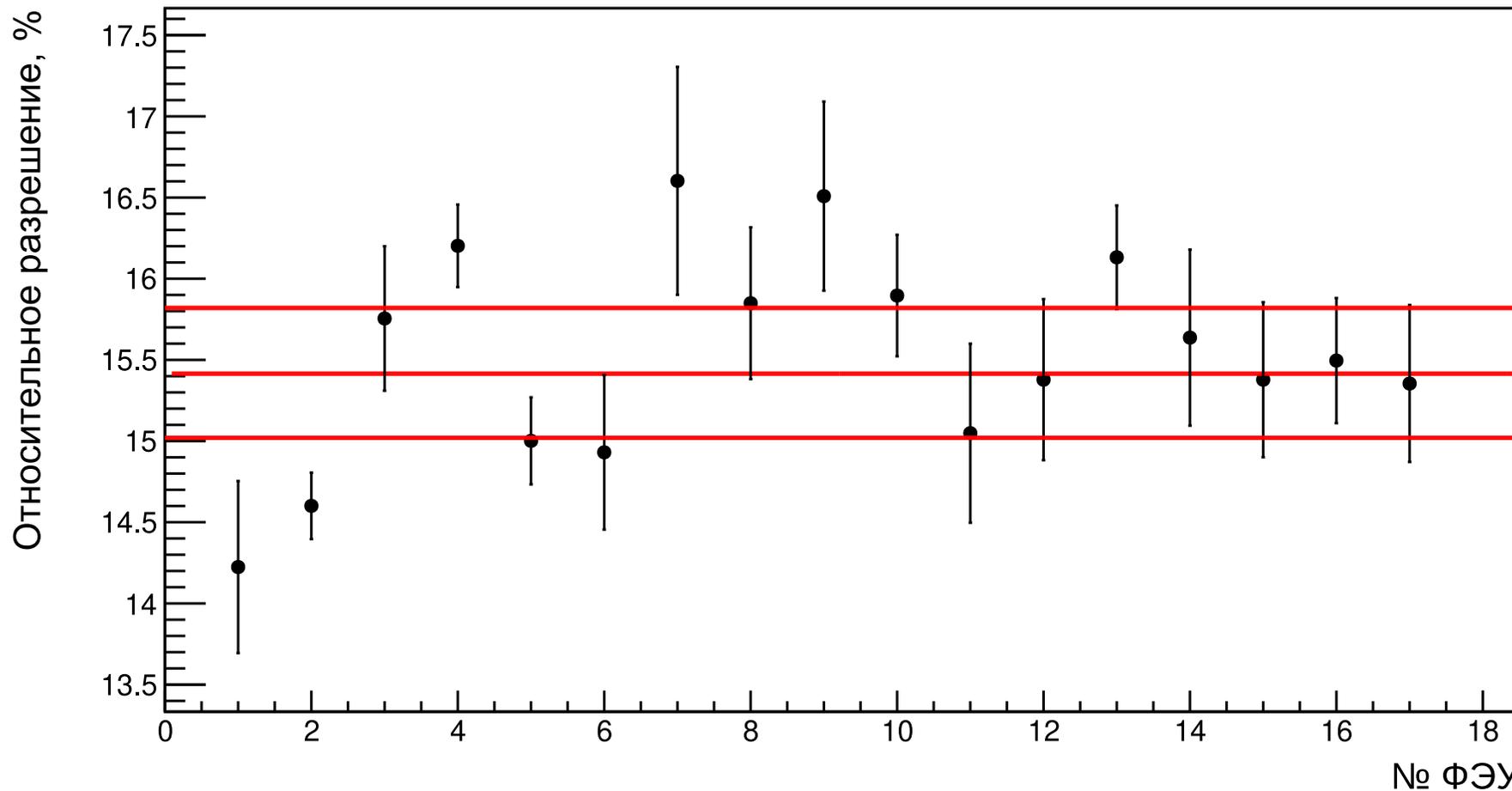
$$\delta = \frac{2.355 \cdot \sigma}{\mu}, \text{ где } \sigma \text{ – абсолютное разрешение.}$$

Для каждого ФЭУ найдена область, в которой δ остается постоянной.

Определен диапазон **рабочих напряжений** для каждого **ФЭУ**



Среднее относительное разрешение (в ед. ПШПВ) для каждого ФЭУ



Разброс средних значений относительных разрешений для 17 ФЭУ

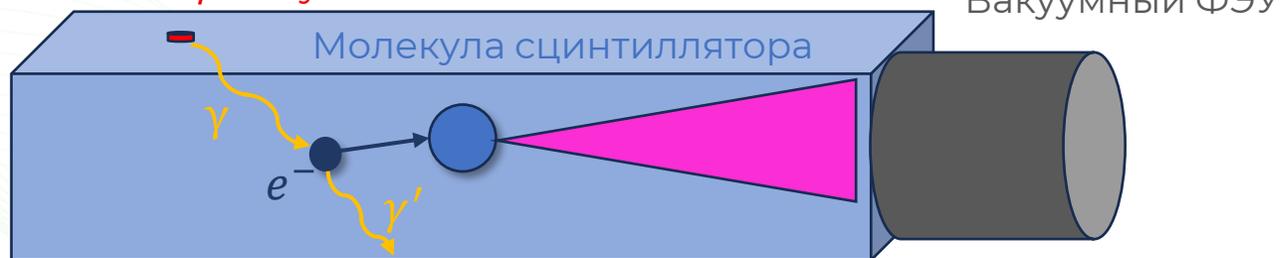
Определение спектрометрических характеристик пластиковых сцинтилляторов



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



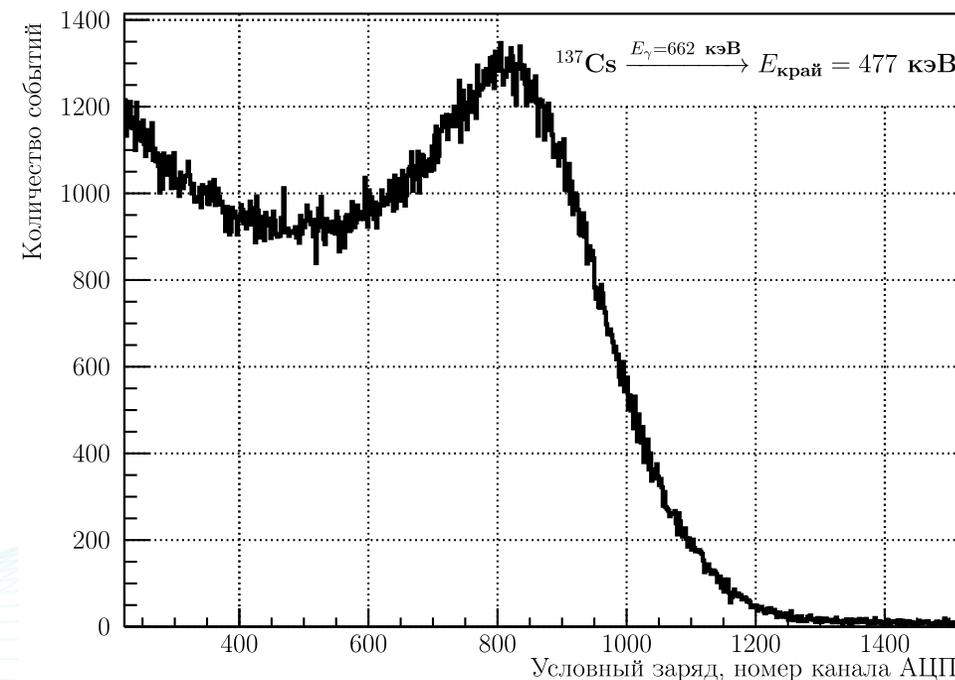
Источник γ -излучения



Сцинтилляционная вспышка

Пластиковый сцинтиллятор

Процесс регистрации γ -излучения в пластиковом сцинтилляторе



Аппаратурная кривая отклика пластикового сцинтиллятора (комптоновское распределение)

Произведено измерение отклика 9 пластиковых сцинтилляторов на источник γ -излучения ^{137}Cs , который помещался в точку 35 см. Пластиковый сцинтиллятор обернут в диффузный отражатель для улучшения светособирания и уменьшения неоднородности.



$$S(Q) = \int_0^{E_{max}} S_{th}(E) \times N \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_E(E)} \cdot e^{-\frac{(E-kQ-b)^2}{2\sigma_E^2(E)}} dE,$$

где $S_{th}(E)$ – спектр по энерговыделению, получаемый методом Монте-Карло;

E – энергия; N – нормировка; k – коэффициент пропорциональности между

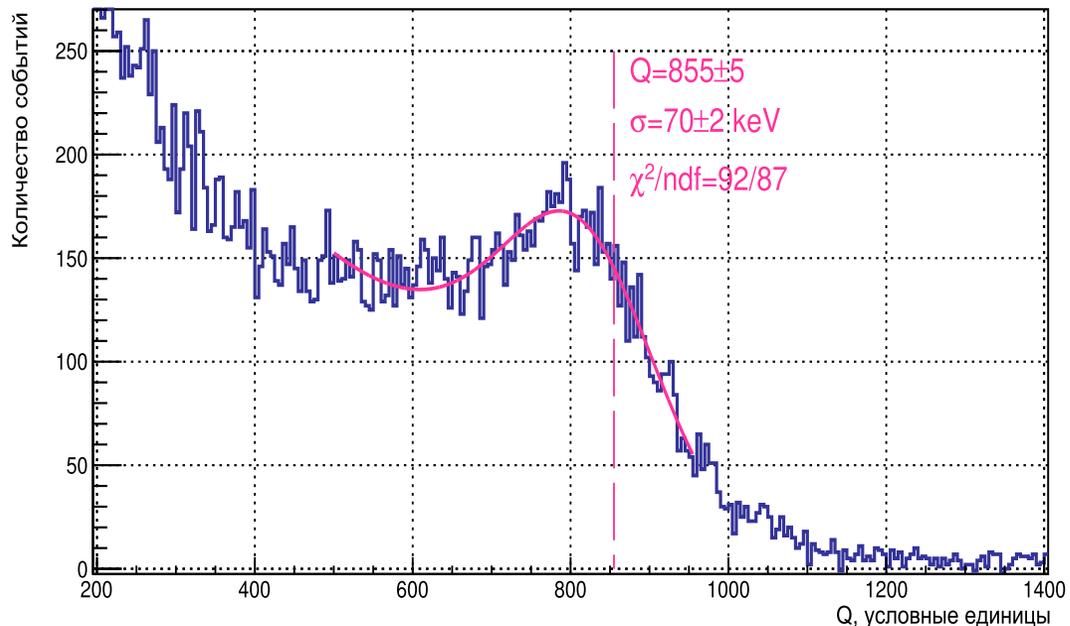
регистрируемой энергией $E_{рег.}$ и условным зарядом Q в линейном приближении:

$E_{рег.} = k \cdot Q + b$, где коэффициент b отвечает за смещение нуля по оси энергии; $\sigma_E(E)$ –

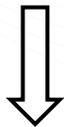
энергетическое разрешение: $\sigma_E(E) = E \cdot \sqrt{\alpha^2 + \frac{\beta^2}{E} + \frac{\gamma^2}{E^2}}$, где α – параметр,

обусловленный неоднородностью детектора; β определяется числом дошедших на

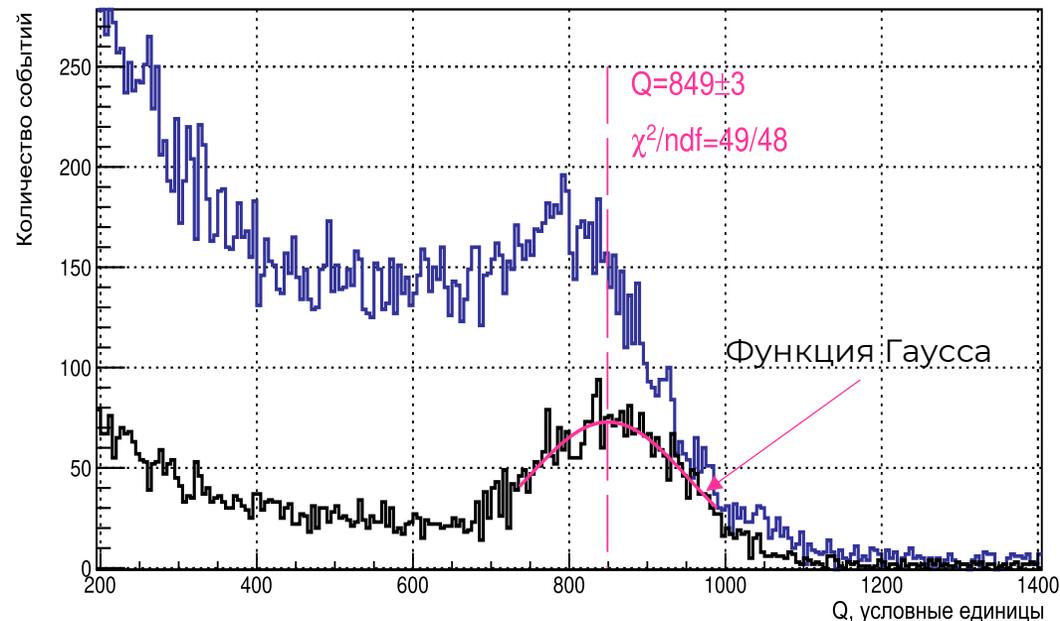
1-ый динод фотоэлектронов; γ – параметр шумов электроники.



Подгонка функцией отклика аппаратурной кривой пластикового СЦ



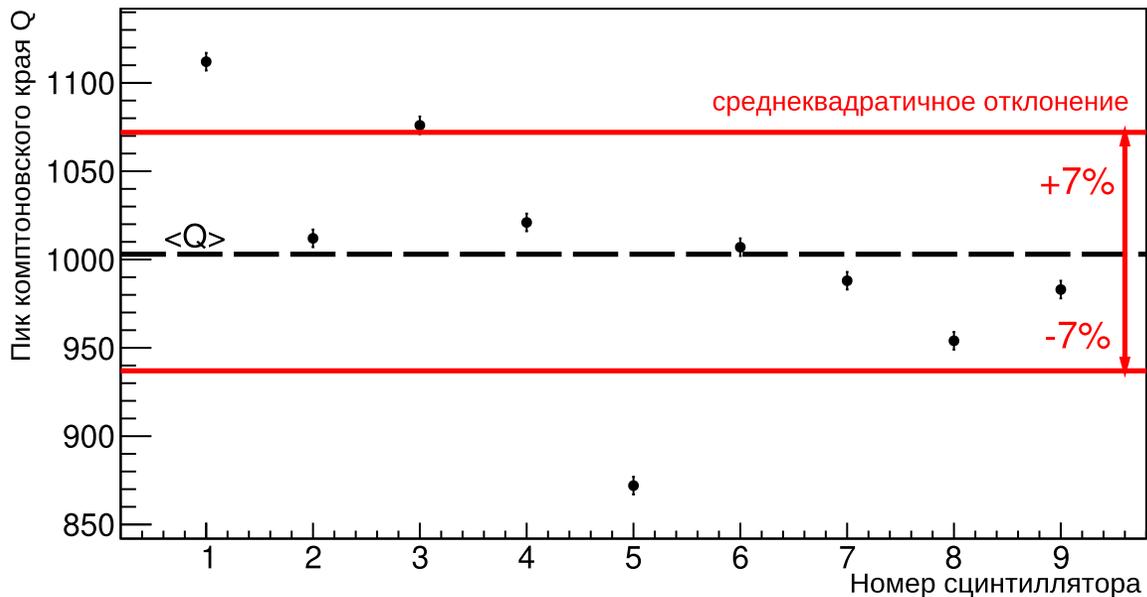
Определение края комптоновского распределения $Q_{\text{края}}$ и энергетического разрешения σ_E .



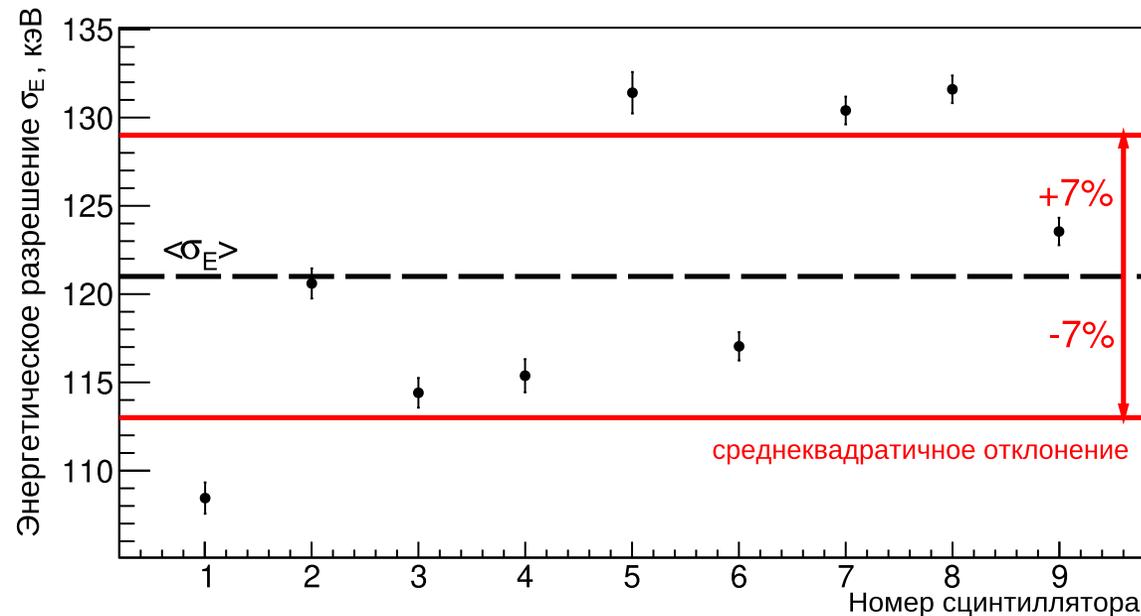
Аппаратурная кривая схемы совпадений для определения края комптоновского распределения



Проверка корректности определения края комптоновского распределения функцией отклика детектора.



Разброс пика комптоновского края $Q_{\text{край}}$ для 9 сцинтилляторов

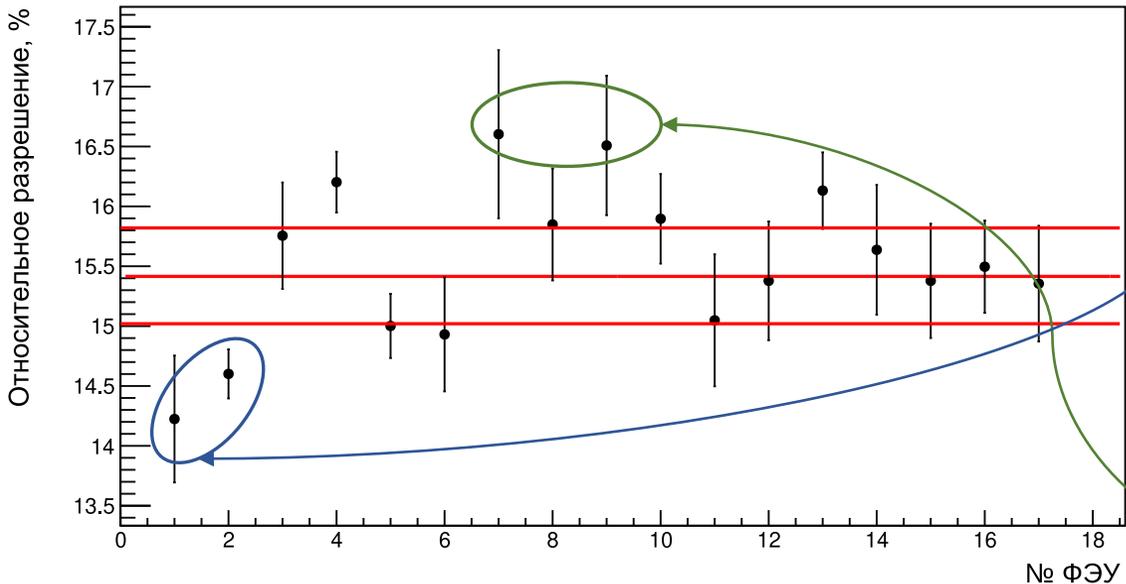


Разброс энергетических разрешений σ_E (в ед. ПШПВ) на линии $E_e = 0.477$ МэВ для 9 сцинтилляторов

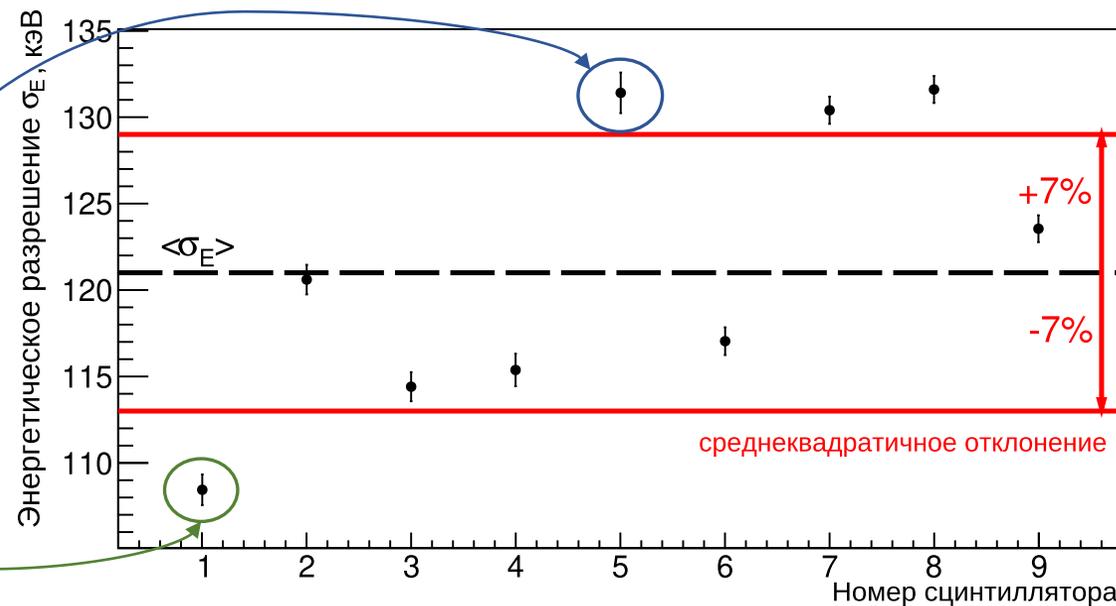
Серьезных отличий между сцинтилляторами **НЕ ВЫЯВЛЕНО.**



Среднее относительное разрешение (в ед. ПШПВ) для каждого ФЭУ



Разброс относительных разрешений 17 ФЭУ



Разброс энергетических разрешений 9 сцинтилляторов

“компенсация” разрешений ФЭУ и сцинтилляторов →
min разброс спектрометрических характеристик спектрометров



В данной работе произведено сравнение органических пластиковых сцинтилляторов и вакуумных ФЭУ – основных компонент будущего детектора реакторных антинейтрино – по их спектрометрическим характеристикам:

- найден предел на амплитуды сигналов ФЭУ (до 600 мВ) и рабочий диапазон подаваемого напряжения питания (от 950 до 1150 В);
- разработана методика определения спектрометрических характеристик органических пластиковых сцинтилляторов;
- определен разброс спектрометрических характеристик пластиковых сцинтилляторов и ФЭУ, предложена методика минимизации данного разброса для сборки спектрометров на их основе.

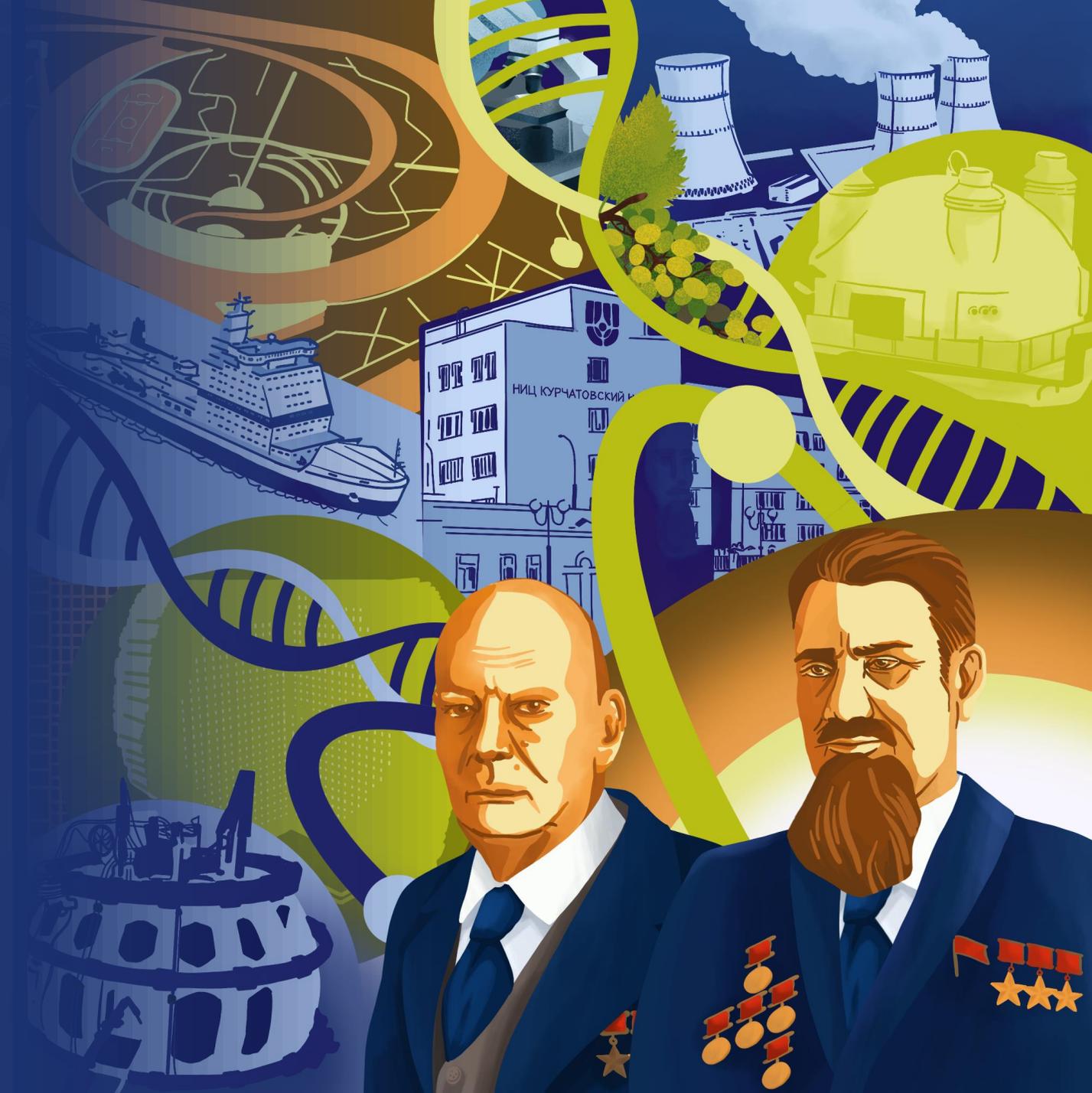


- Выступление на XI Всероссийском с международным участием Молодежном научном форуме "**OpenScience 2024**" (с публикацией сборника тезисов), 13-15 ноября 2024 года, г. Гатчина;
- Выступление на XVIII Курчатовской междисциплинарной молодежной научной школе (с публикацией сборника аннотаций докладов), 27-30 мая 2025 года, г. Москва.



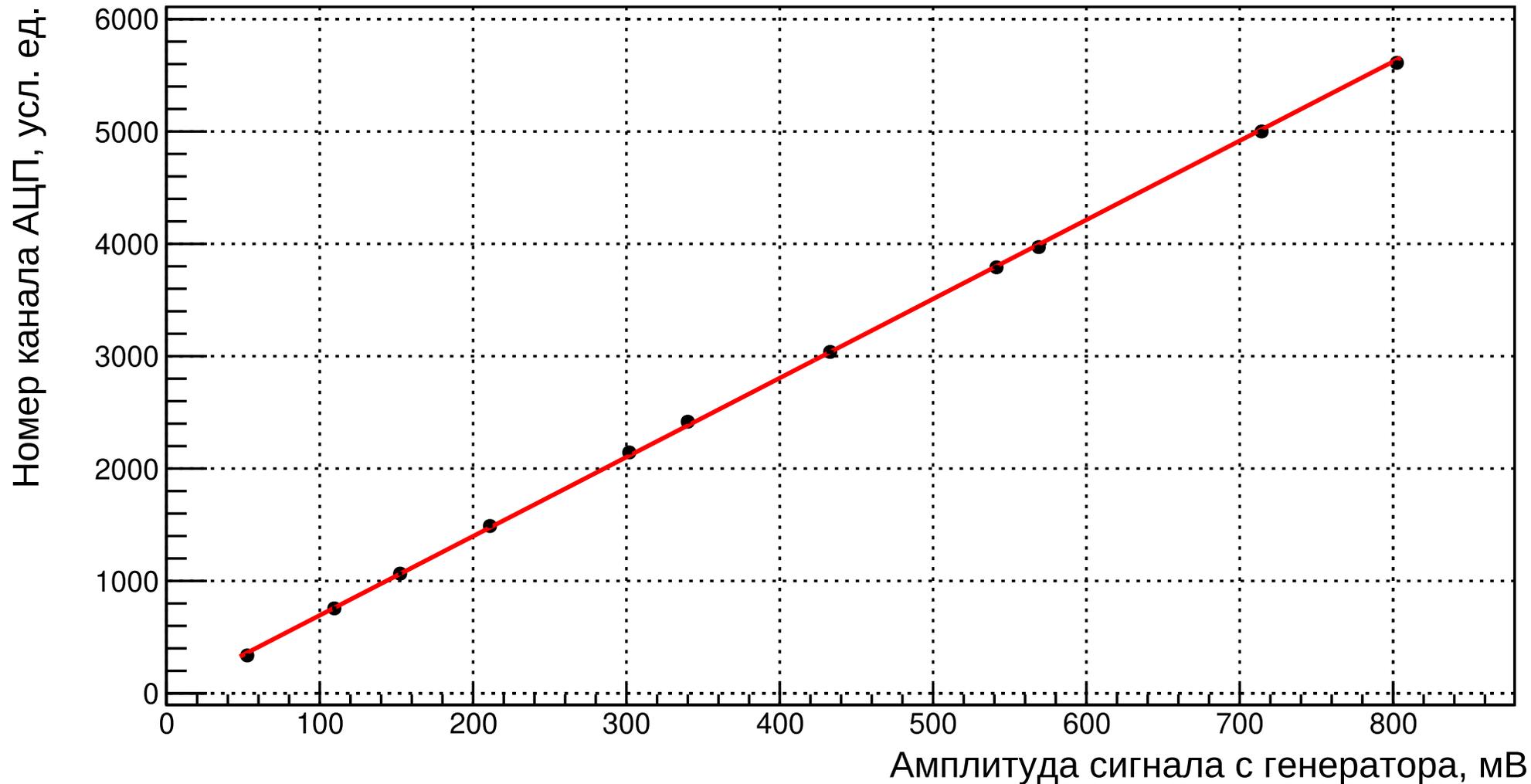
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Спасибо за
внимание!



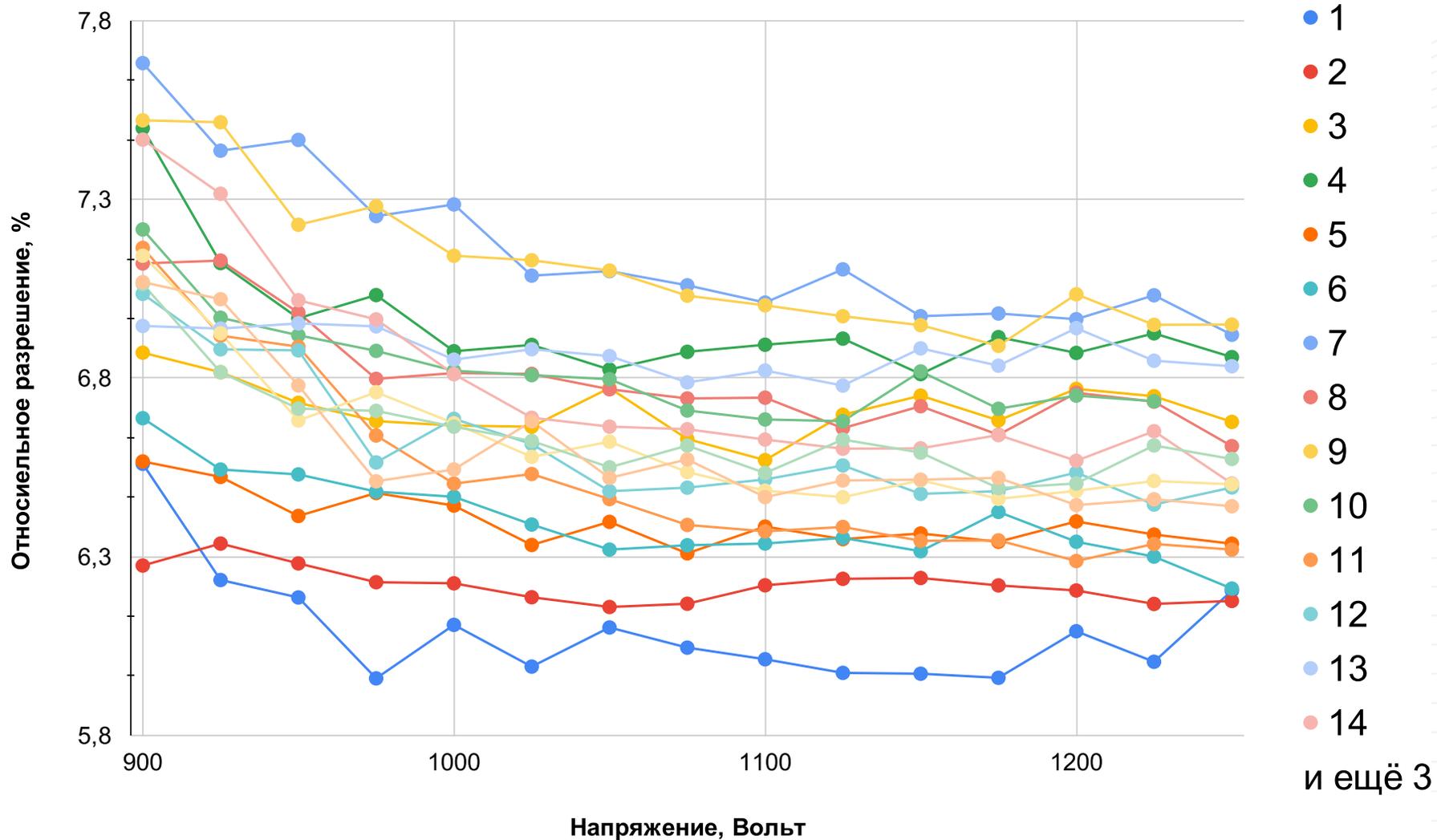


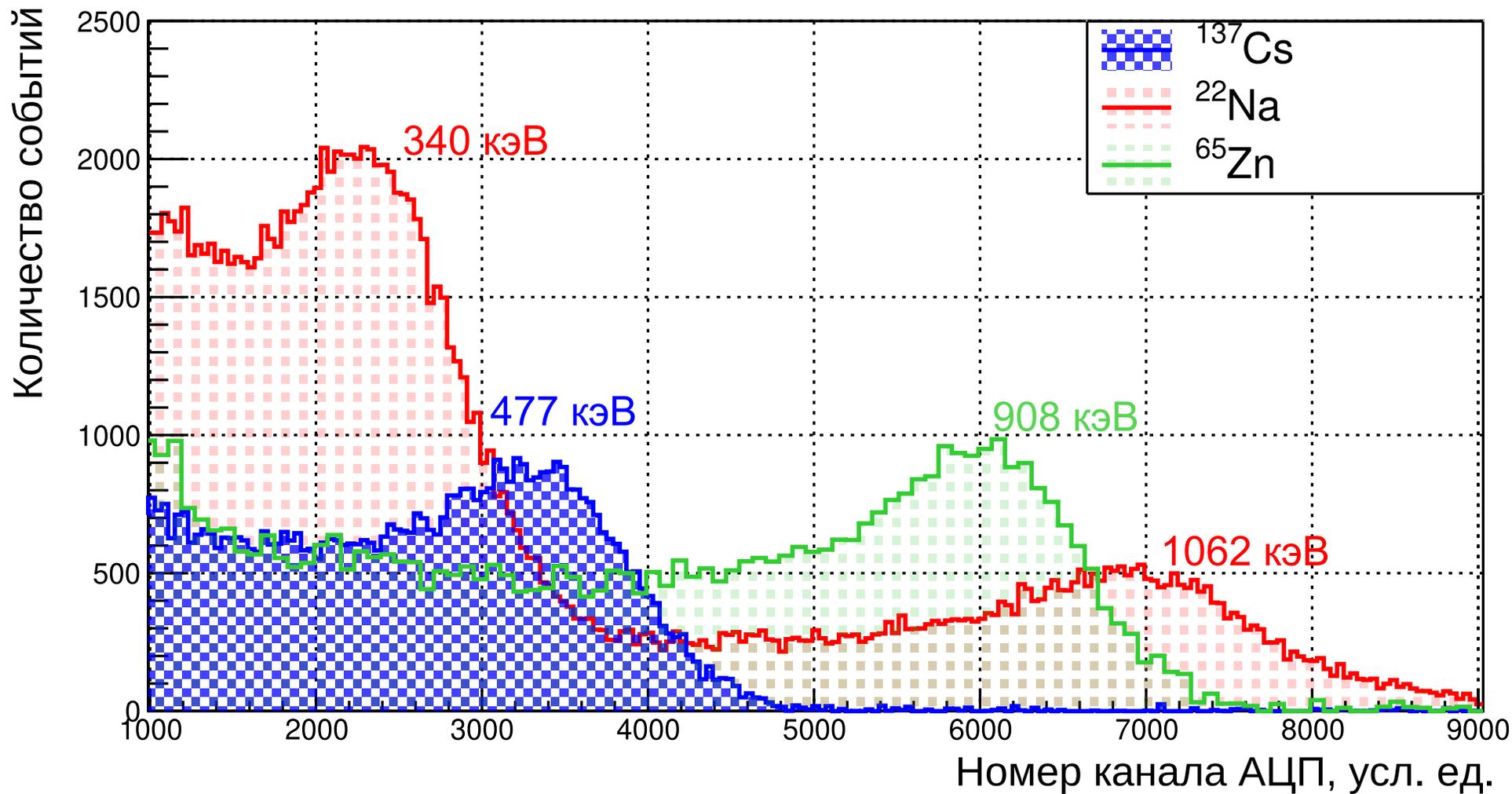
Линейность АЦП



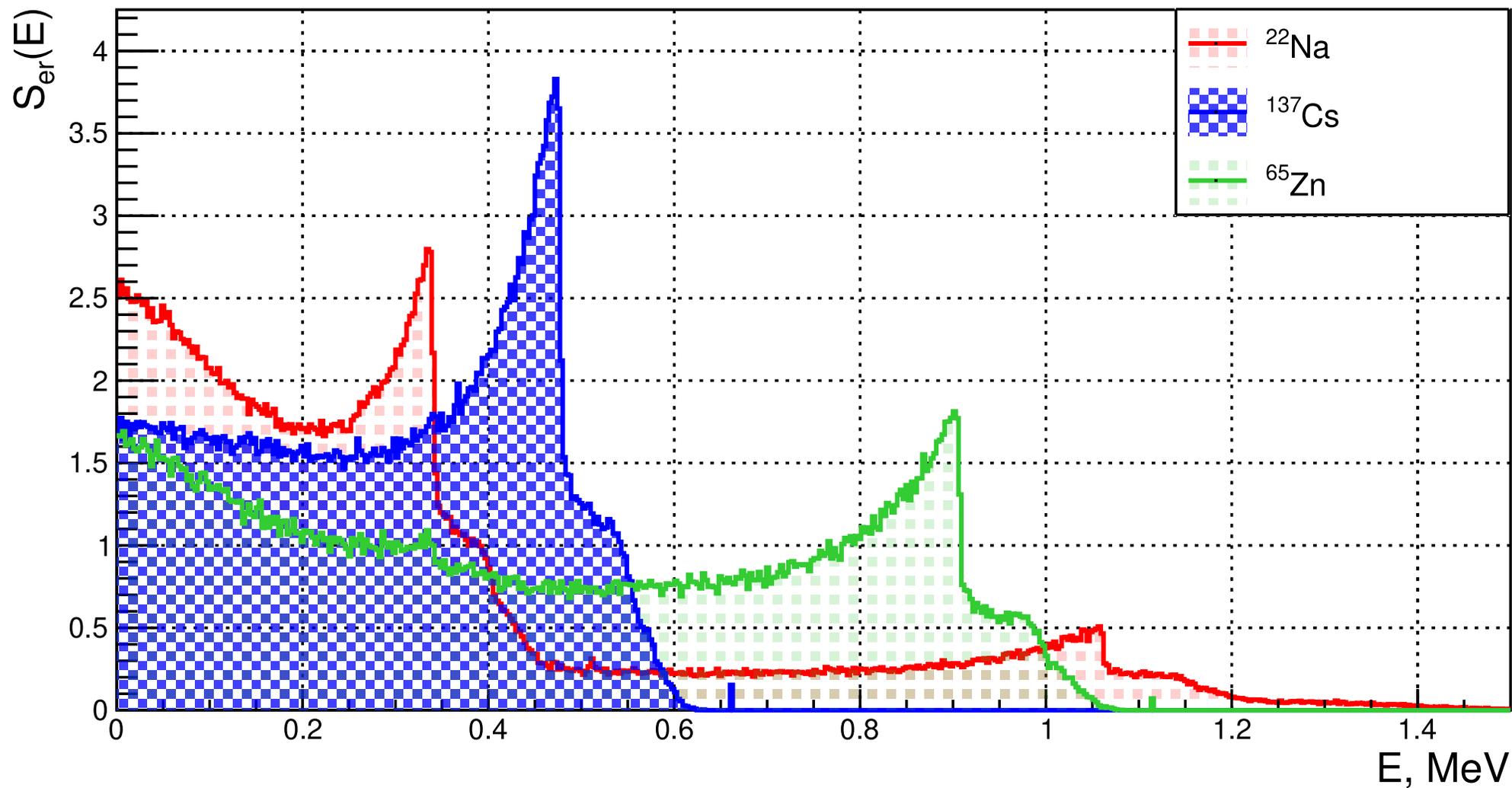


Зависимость отклика ФЭУ от напряжения





Аппаратурные кривые спектрометра для ^{137}Cs (синяя), ^{60}Co (зеленая) и ^{22}Na (красная)



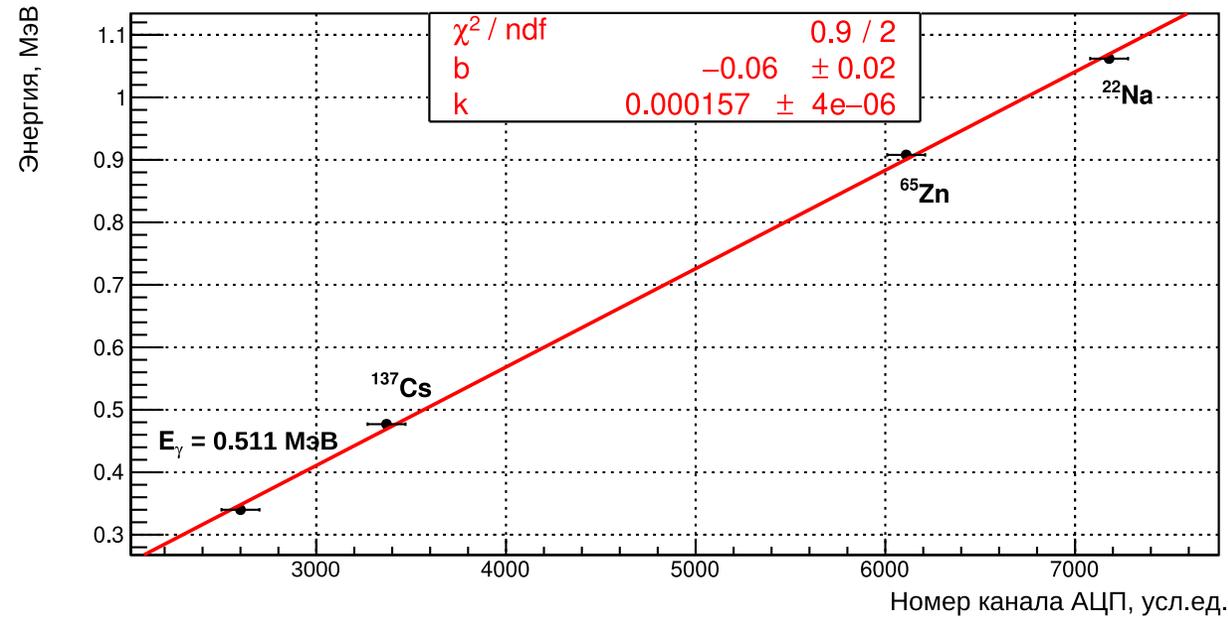
Дополнительные слайды: энергетическая шкала и относительное разрешение



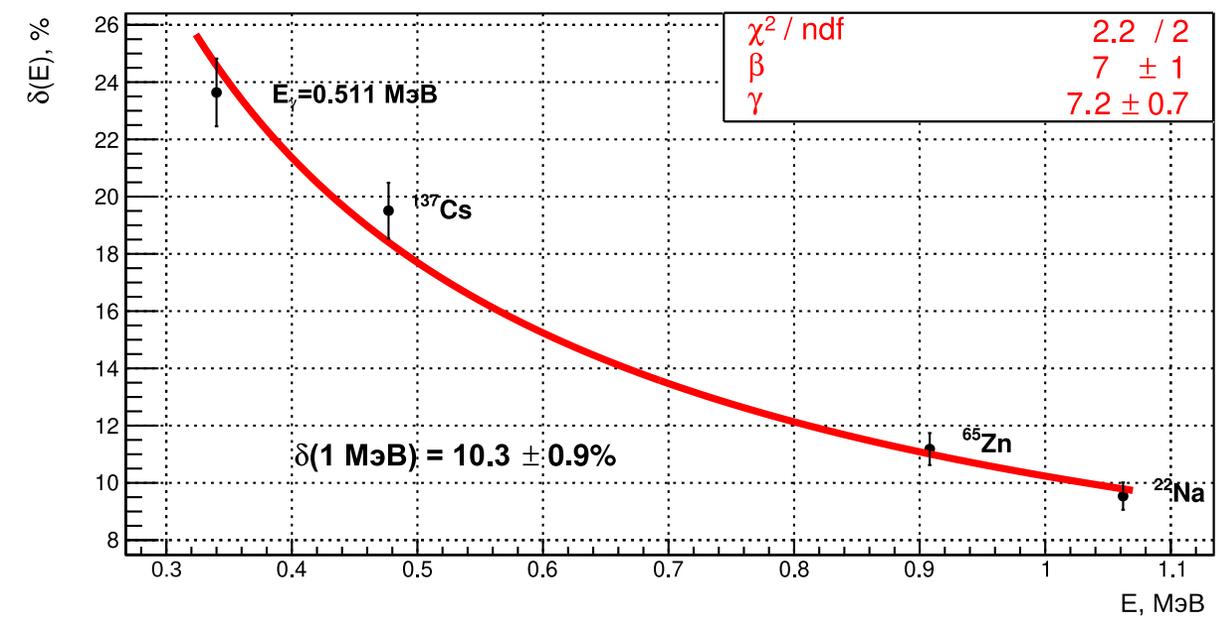
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



Калибровка энергетической шкалы



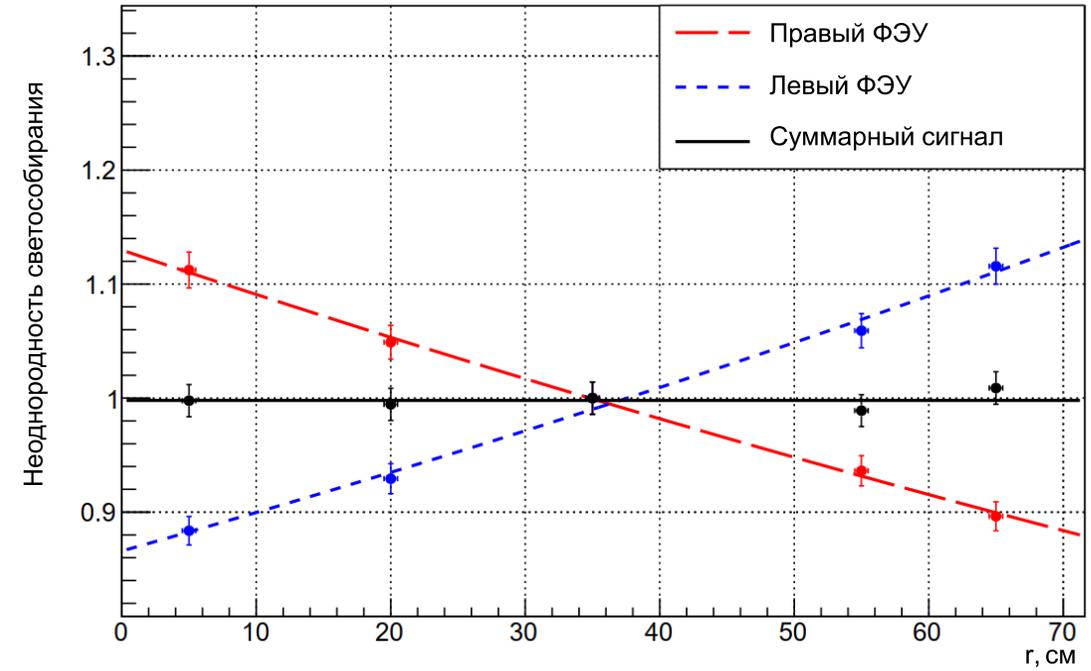
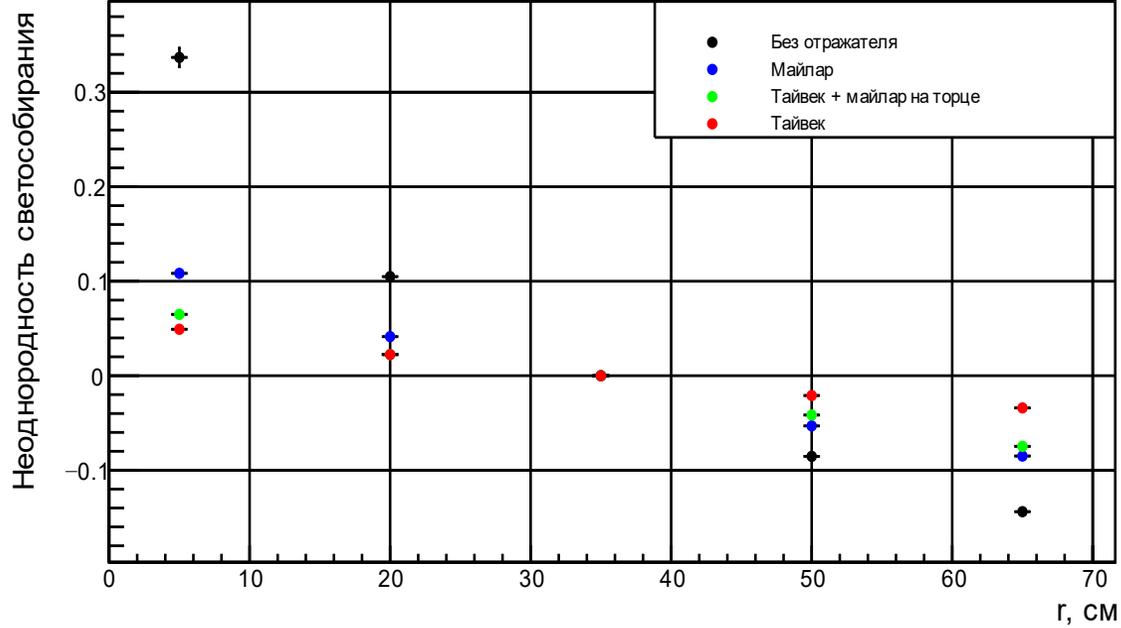
Относительное энергетическое разрешение (в единицах ПШПВ)



Дополнительные слайды: неоднородность светособирания и сравнение отражателей



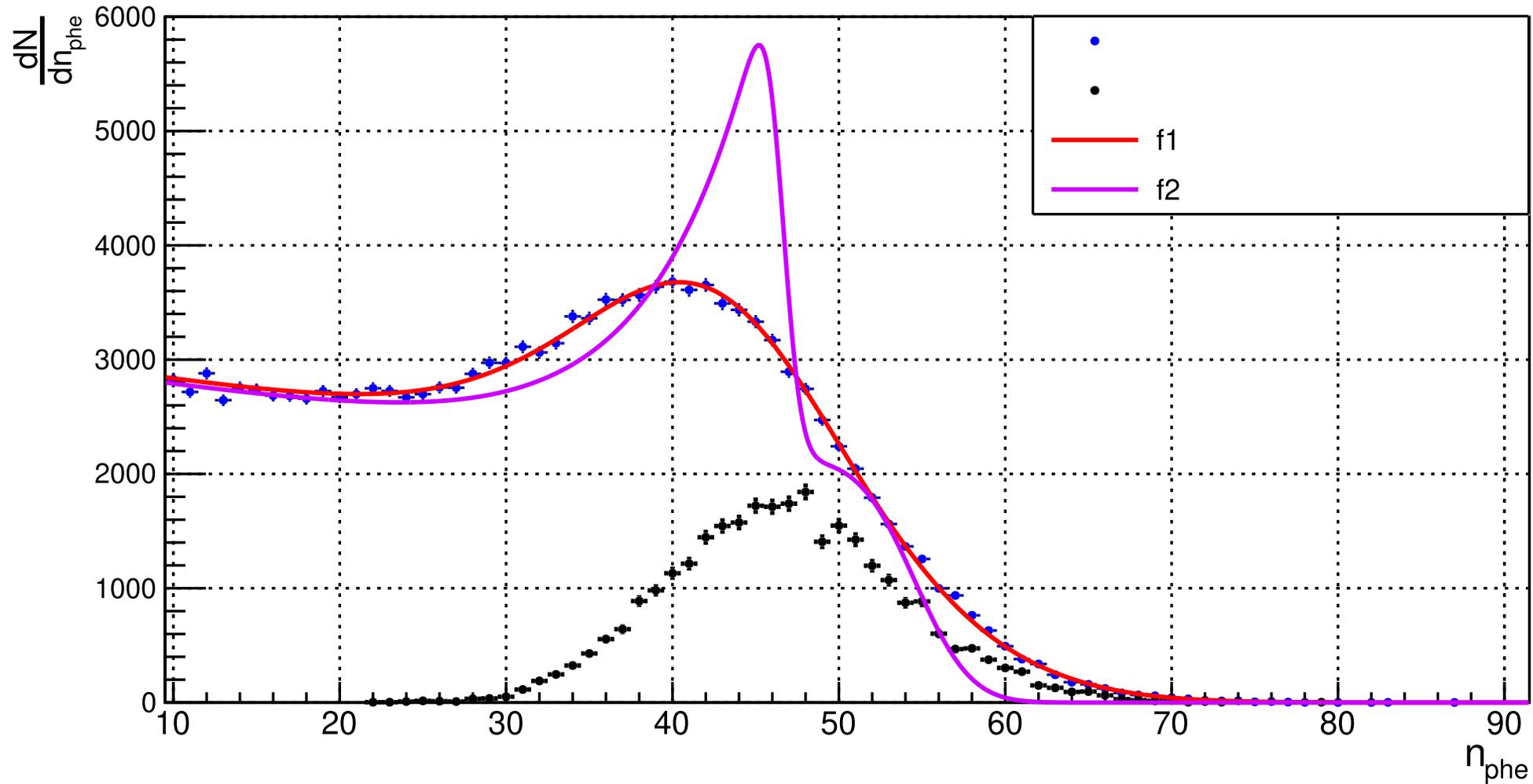
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



Дополнительные слайды: спектры с разыгранными моно-электронами с энергией комп. края



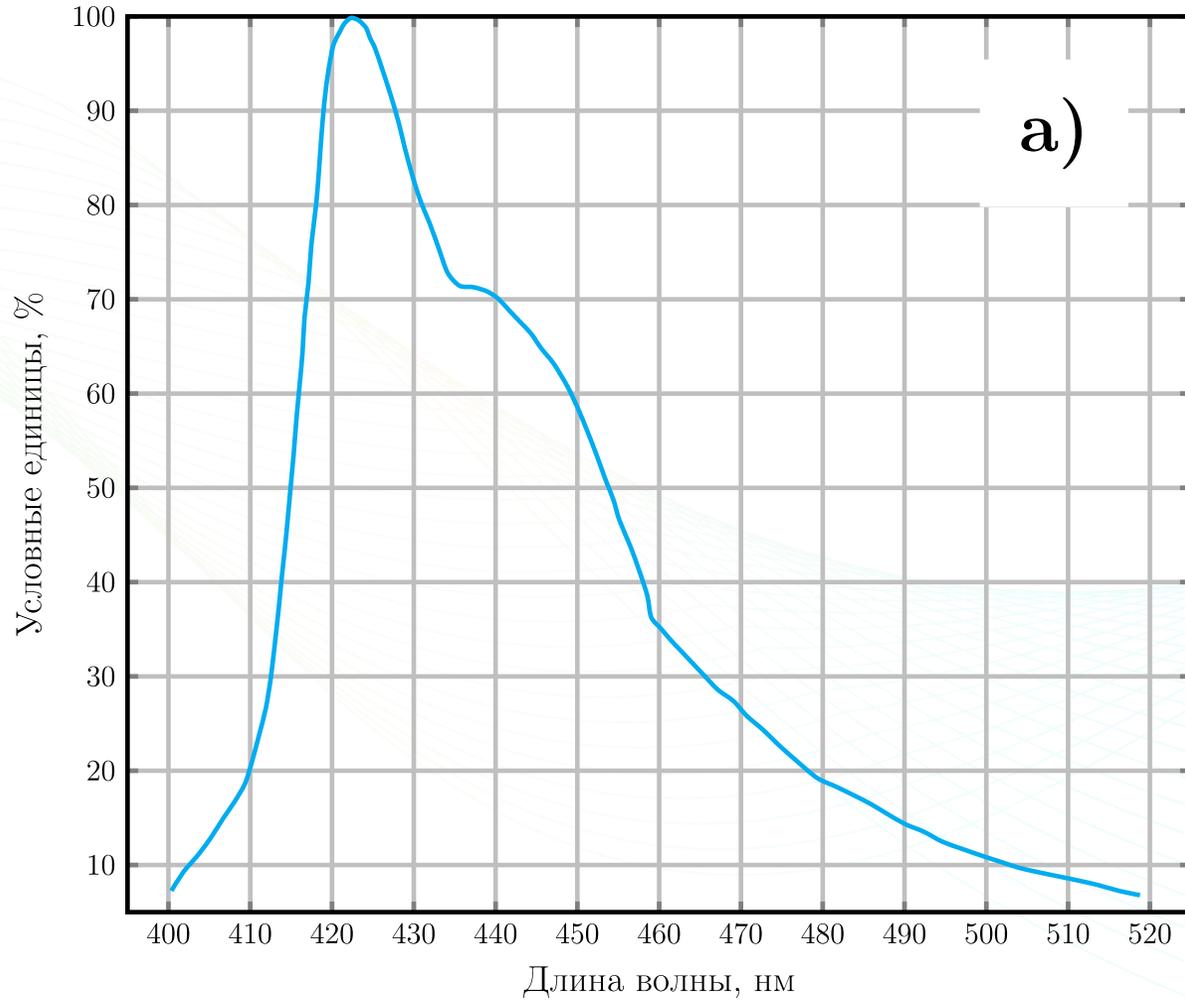
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



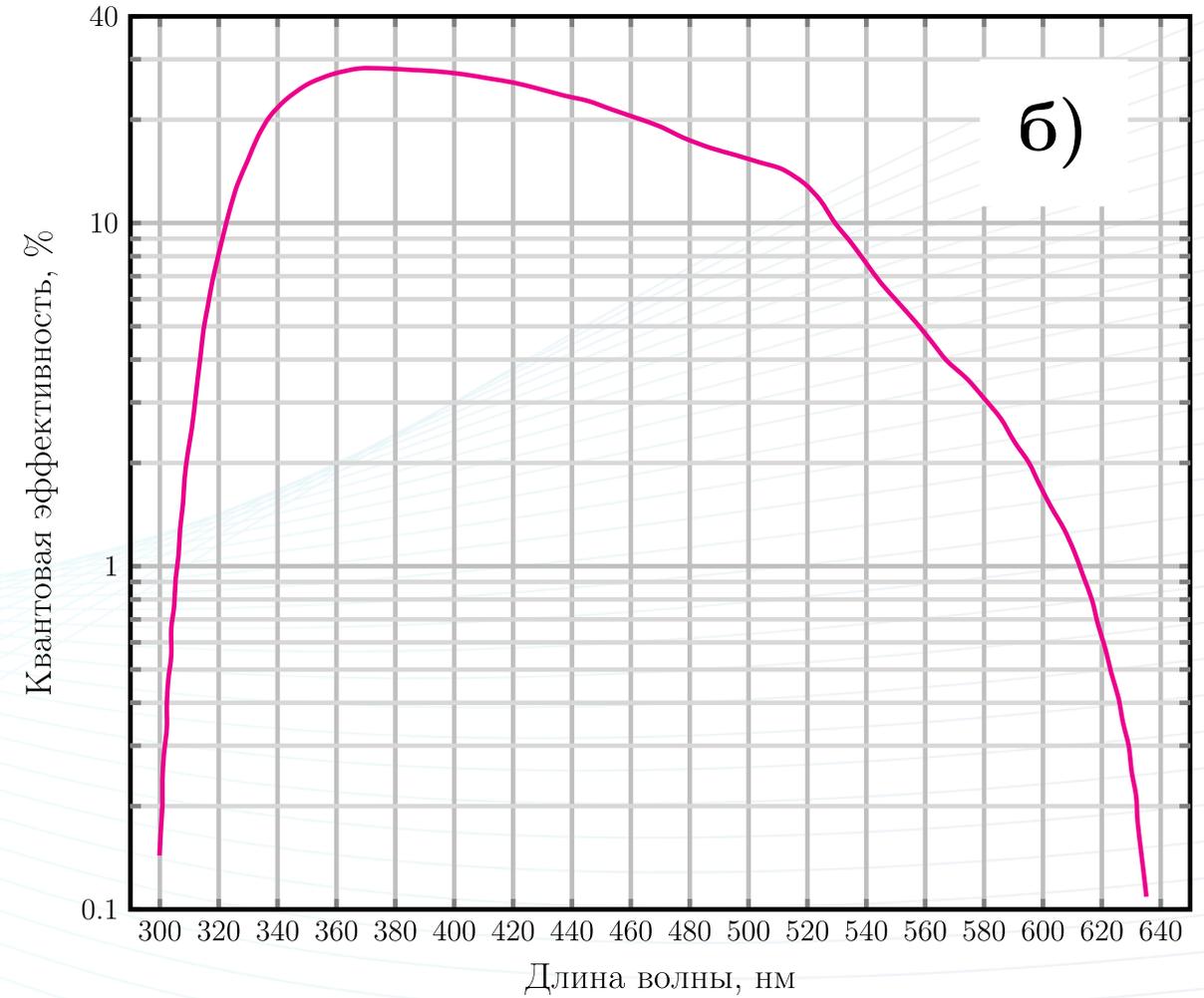
Дополнительные слайды: спектры эмиссии сцинтиллятора и поглощения ФЭУ



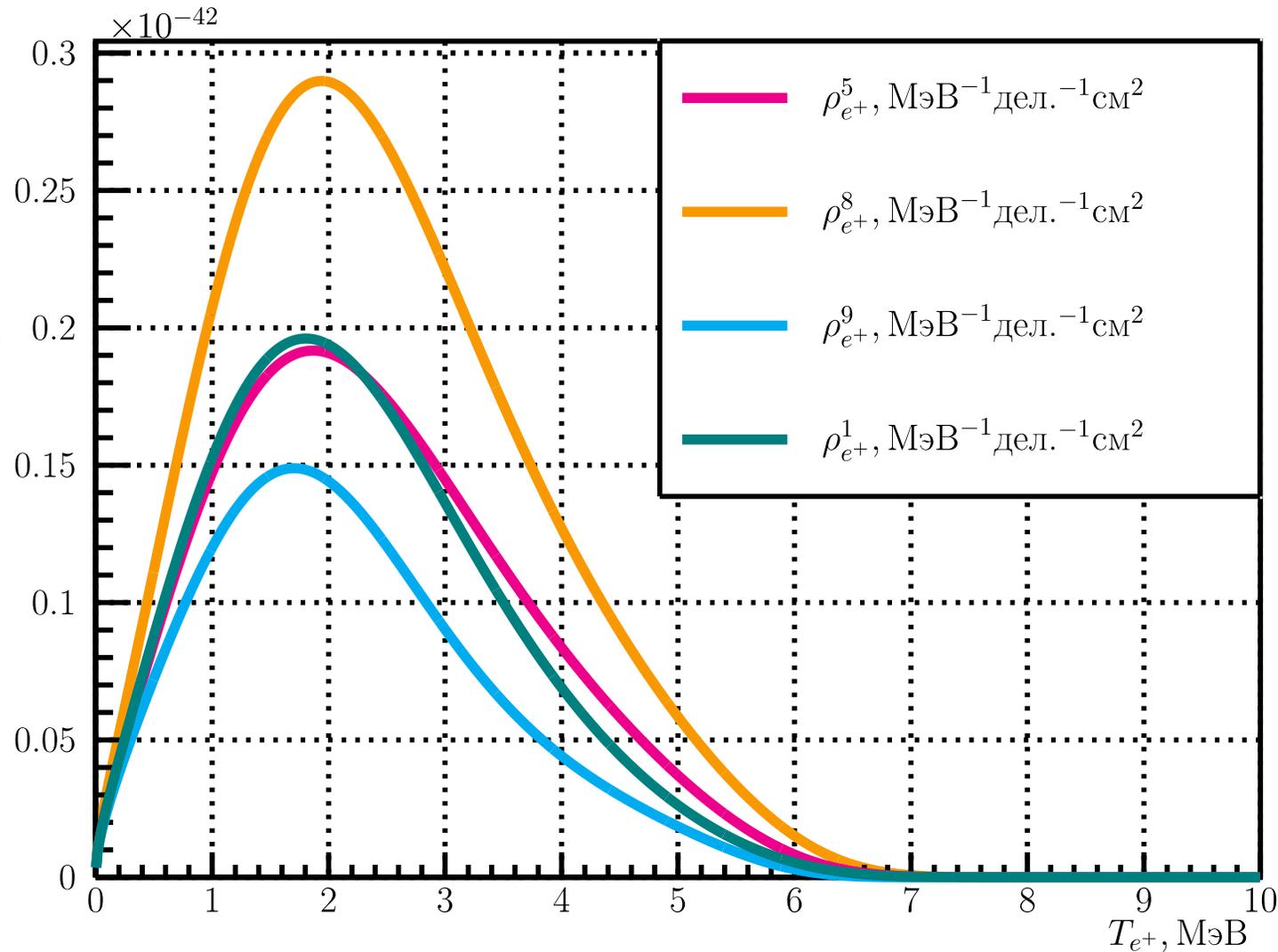
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



Спектр высвечивания пластикового сцинтиллятора



Спектр поглощения ФЭУ, нормированный на квантовую эффективность



Спектры позитронов ОБР
продуктов деления i -ого изотопа
«в момент рождения»,
нормированные на одно
деление i -ого изотопа:
 $\rho^5, \rho^8, \rho^9, \rho^1$ соответствуют ^{235}U , ^{238}U ,
 ^{239}Pu и ^{241}Pu .

Дополнительные слайды: доли делений для типичной кампании реактора типа ВВЭР



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

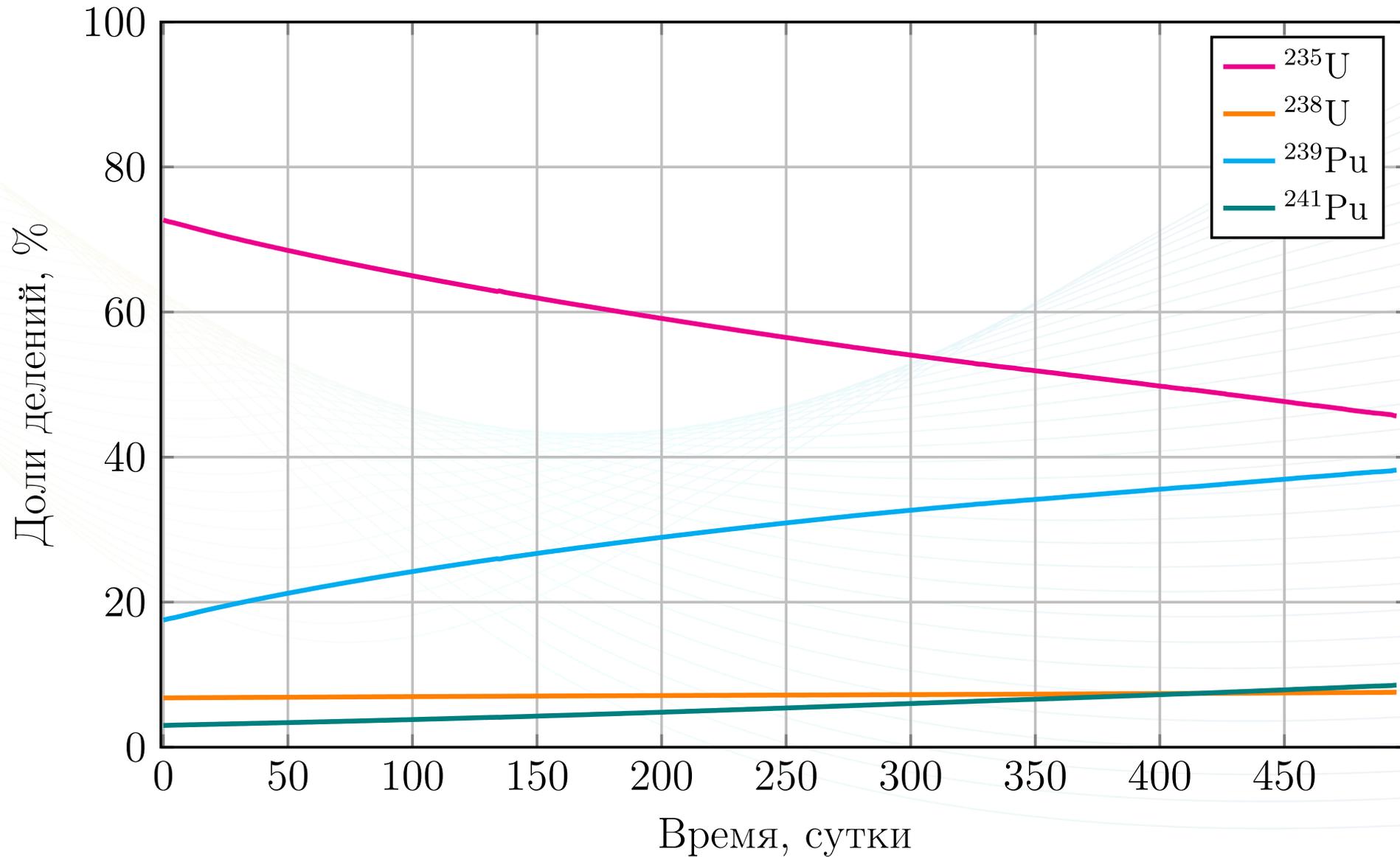




Таблица 1.2 — Различные методы детектирования реакторных $\bar{\nu}_e$ [37]. CC (NC) обозначает взаимодействие по заряженному току (нейтральному току). Сечение усреднено по всему спектру энергии $\bar{\nu}_e$. N и Z — число нейтронов и протонов в ядре рабочего вещества соответственно. Для этих оценок предполагается, что доли деления составляют 58%, 29%, 8% и 5% для ^{235}U , ^{239}Pu , ^{238}U и ^{241}Pu соответственно.

Реакция	Тип взаимодействия	Сечение реакции (10^{-44} см ² /деление)	Порог (МэВ)
$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	CC	~ 63	1.8
$\bar{\nu}_e + d \rightarrow n + n + e^+$	CC	~ 1.1	4.0
$\bar{\nu}_e + d \rightarrow n + p + \bar{\nu}_e$	NC	~ 3.1	2.2
$\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow \bar{\nu}_e + e^-$	CC/NC	$\sim 0.4 \times Z$	0
$\bar{\nu}_e + A \rightarrow \bar{\nu}_e + A$	NC	$\sim 9.2 \times N^2$	0

37. Qian X., Peng J.-C. Physics with reactor neutrinos // Reports on Progress in Physics. — 2019. — Vol. 82, no. 3. — P. 036201.



Таблица 1.3 — Различные процессы, используемые для детектирования нейтронов отдачи для реакции ОБР. Перечислены каналы обнаружения и соответствующие сечения захвата для тепловых нейтронов. В скобках приведена энергия, уносимая γ -квантами. В реакциях с Cd и Gd образуется большое количество γ -квантов, поэтому для данных реакций в скобках указана суммарная уносимая энергия γ -квантами.

Мишень	Реакция	Сечение реакции (барн) для теплового нейтрона
H	$n + p \rightarrow d + \gamma$ (2.2 МэВ)	~ 0.33
^3He	$n + ^3\text{He} \rightarrow p + ^3\text{H} + 0.764$ МэВ	~ 5300
^6Li	$n + ^6\text{Li} \rightarrow \alpha + ^3\text{H} + 4.8$ МэВ	~ 950
^{10}B	$n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^{11}\text{B}^*$ $^{11}\text{B}^* \rightarrow \alpha + ^7\text{Li} + 2.79$ МэВ, 6% $^{11}\text{B}^* \rightarrow \alpha + ^7\text{Li} + \gamma$ (0.48 МэВ) + 2.31 МэВ, 94%	~ 3860
^{113}Cd	$n + ^{113}\text{Cd} \rightarrow ^{114}\text{Cd} + \gamma$ ($\sum E_\gamma = 9.04$ МэВ)	~ 20600
Gd	$n + ^{155}\text{Gd} \rightarrow ^{156}\text{Gd} + \gamma$ ($\sum E_\gamma = 8.5$ МэВ) $n + ^{157}\text{Gd} \rightarrow ^{158}\text{Gd} + \gamma$ ($\sum E_\gamma = 7.9$ МэВ)	~ 61000 ~ 256000