



НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

# Разработка сцинтиляционного спектрометра для детектирования реакторных антинейтрино

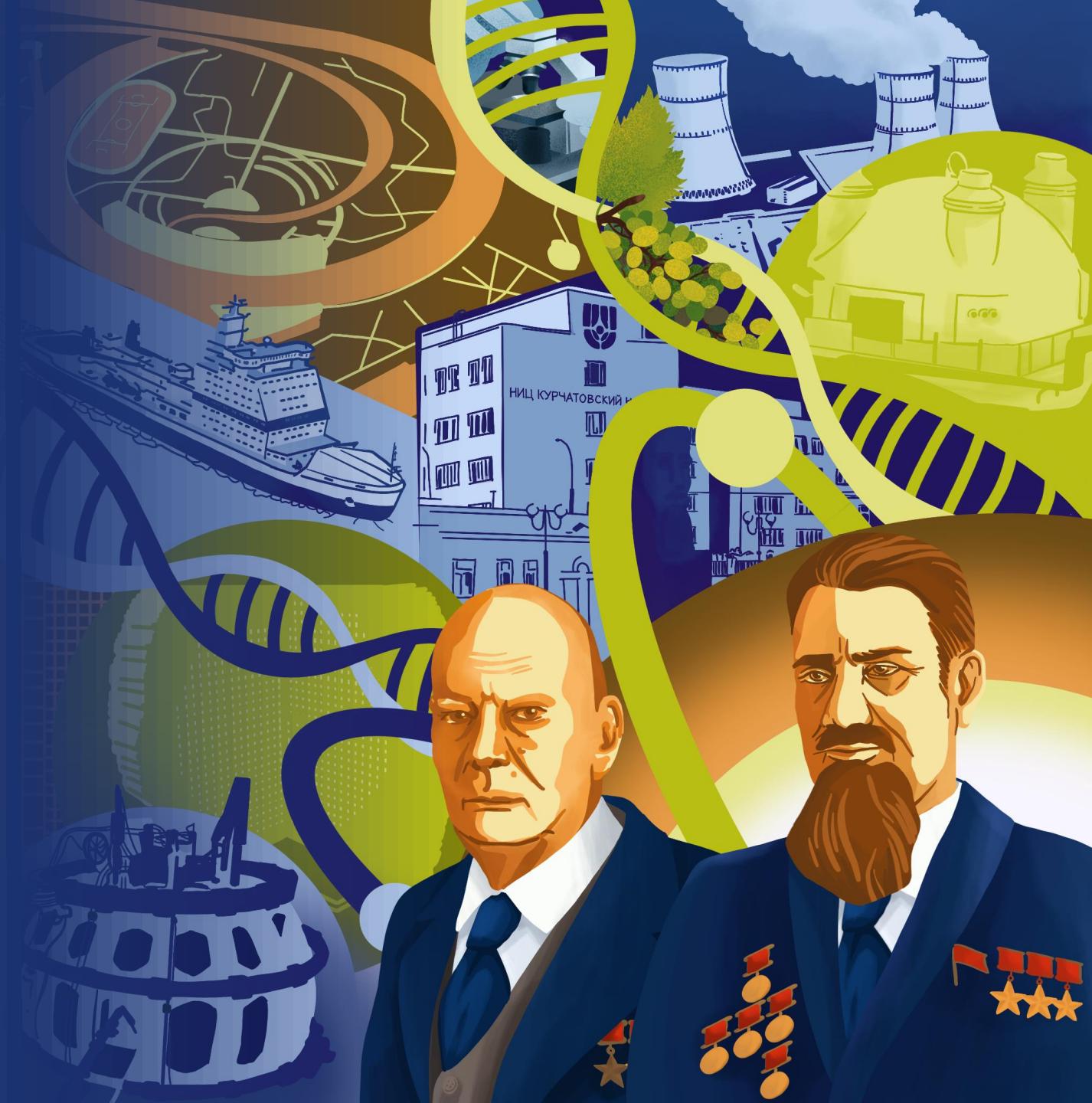
Студент: Р.Р. Биктимиров<sup>1,2,\*</sup>

Научный руководитель: Д.В. Попов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ», Москва, Россия

\*Biktimirov\_RR@nrcki.ru





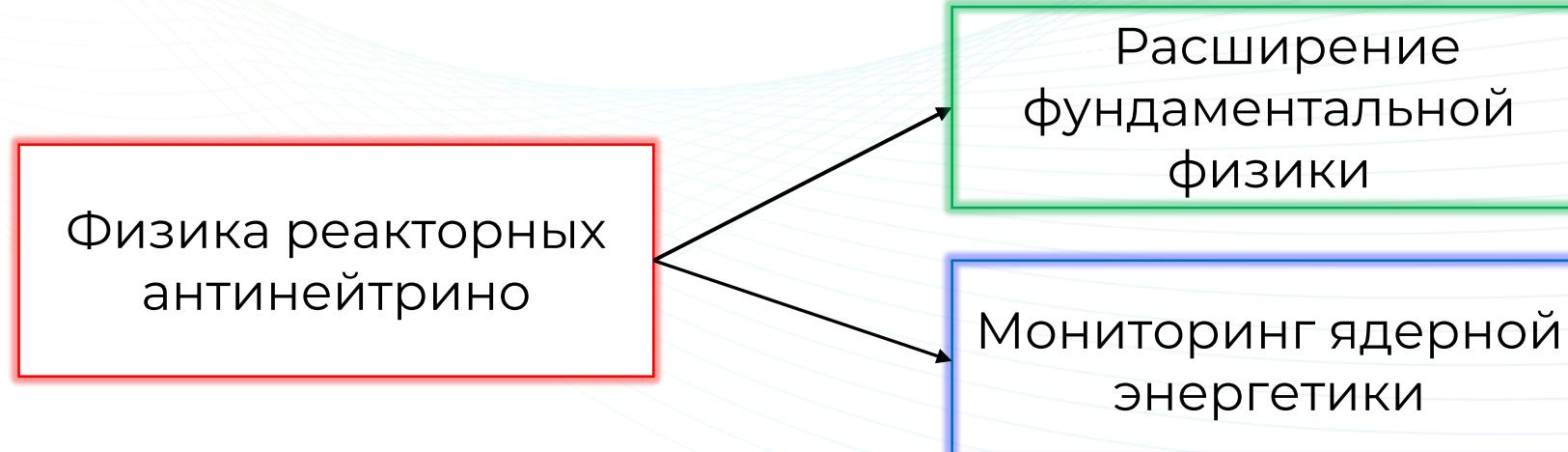
### Цель:

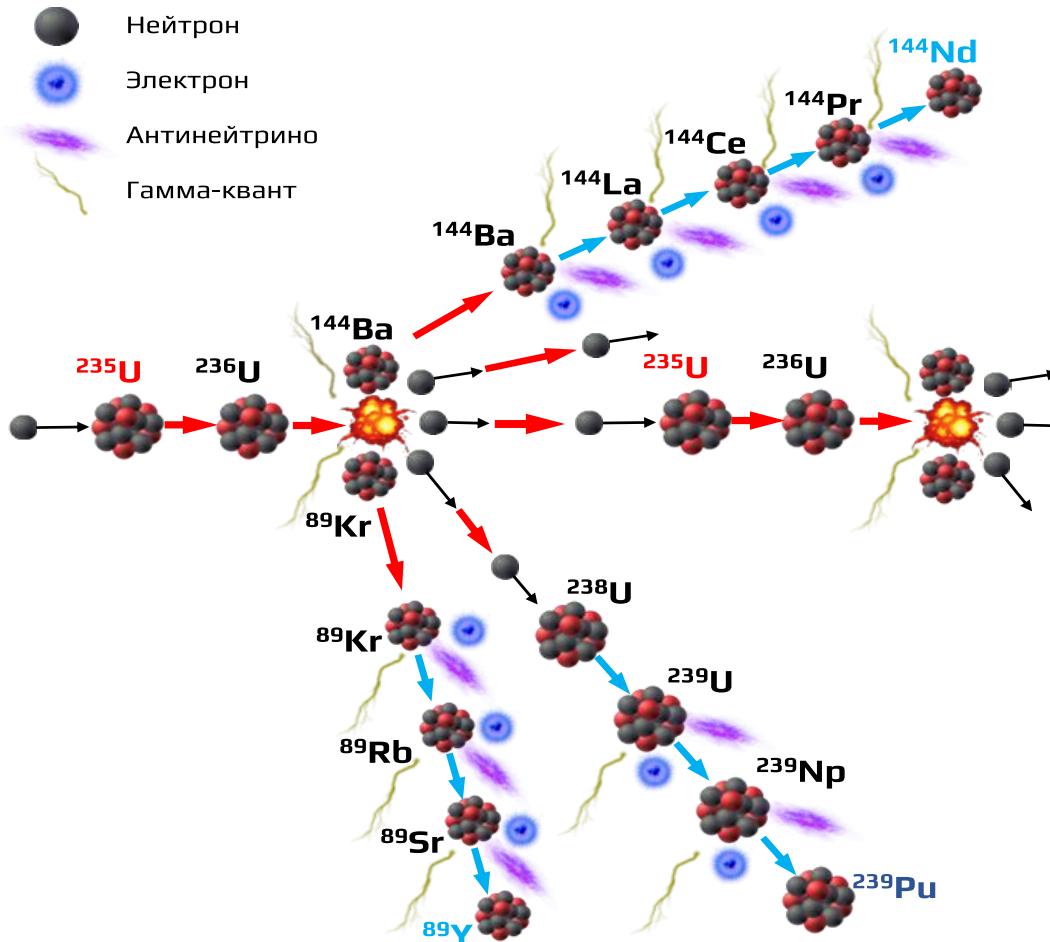
Сборка блока модульного детектора реакторных антинейтрино на основе органических пластиковых сцинтилляторов и определение его спектрометрических характеристик.

### Задачи:

- Подобрать оптимальную конфигурацию модулей блока детектора реакторных антинейтрино;
- Разработать конструкцию модуля и блока детектора;
- Собрать модули и блок детектора и проверить их работоспособность.

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

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

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

Для ядерного реактора мощностью  $P = 3$  ГВт:

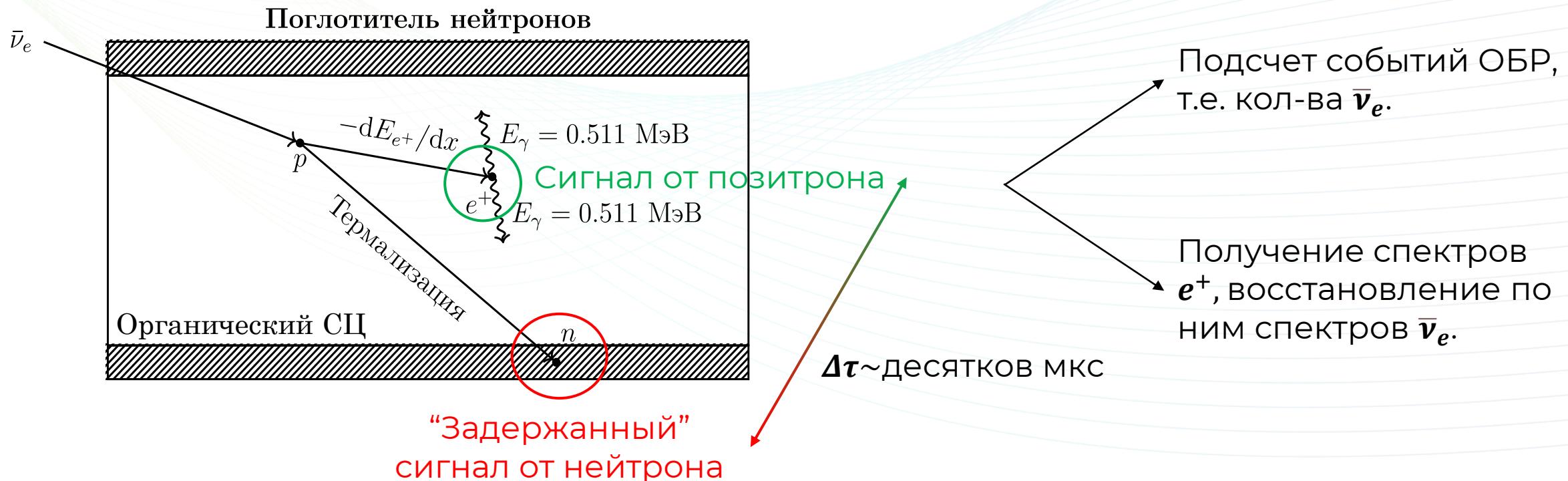
$$N_{\text{делений}} = \frac{3 \text{ ГВт}}{200 \text{ МэВ}} \approx 10^{20} [\text{с}^{-1}] \Rightarrow N_{\bar{\nu}} \approx 10^{21} [\text{с}^{-1}].$$

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



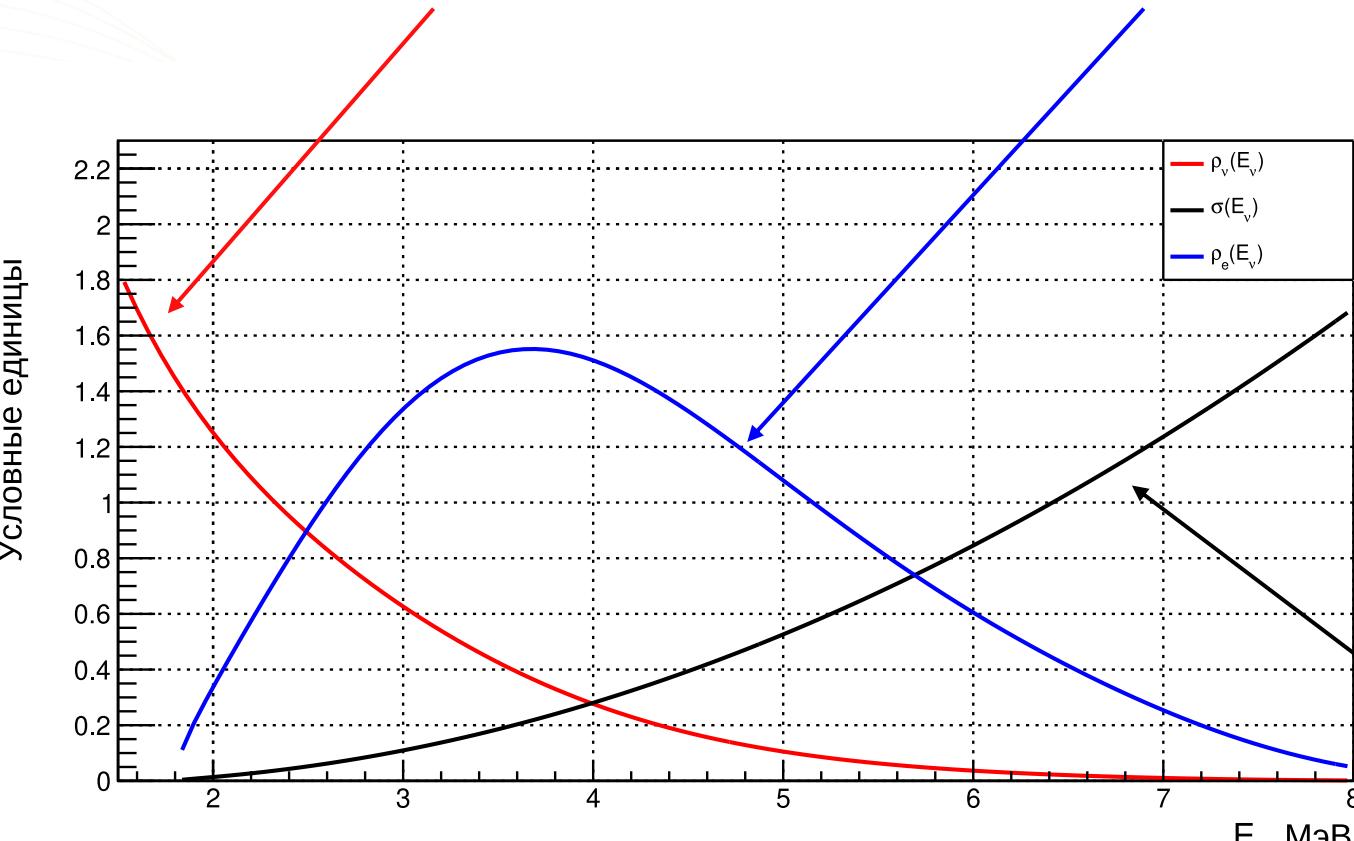
В 1956 г. Райнес и Коэн экспериментально подтвердили существование нейтрино по реакции **обратного бета-распада (ОБР)**  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ . С 1956 г. и по настоящее время реакция ОБР широко используется в экспериментах по физике реакторных антинейтрино.

## 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  $E_{\text{рег.}}$ :

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

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

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



## Поглотитель нейтронов



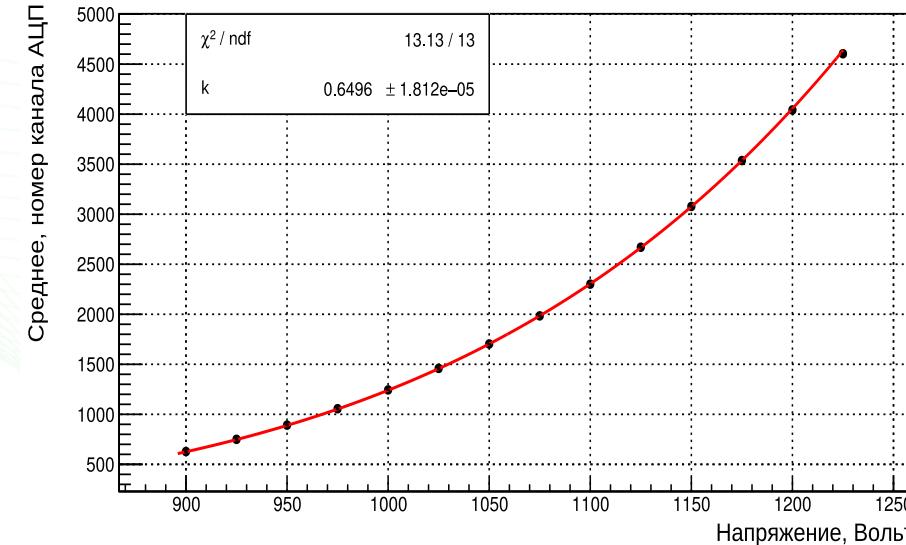
Функциональный вид спектрометра

### Спектрометр:

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

Блок детектора: сборка из нескольких независимых спектрометров.

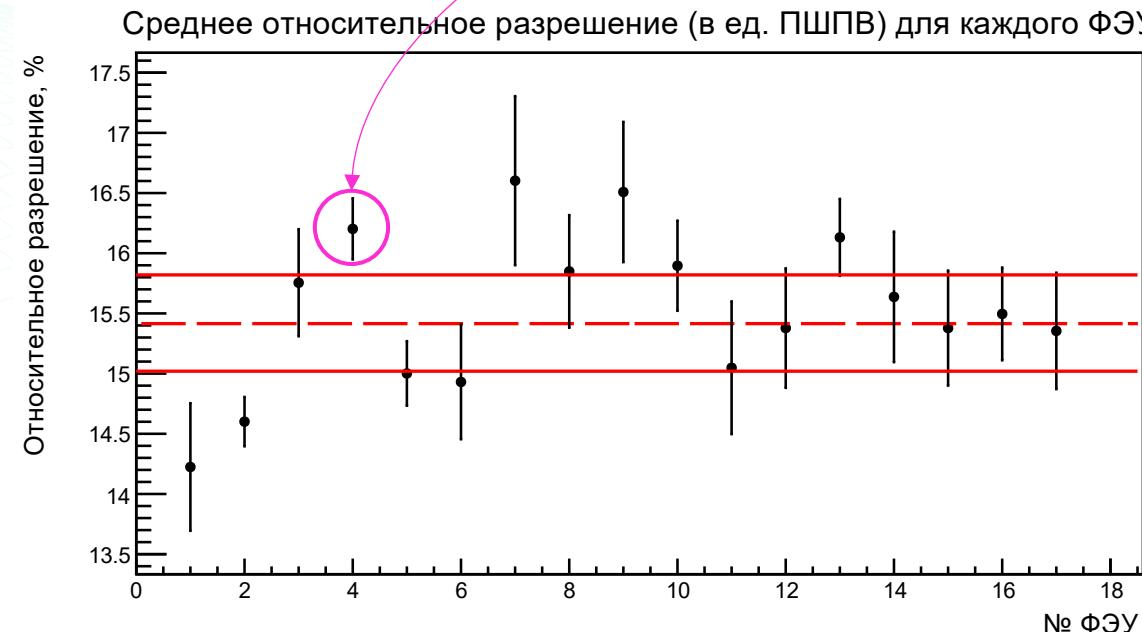
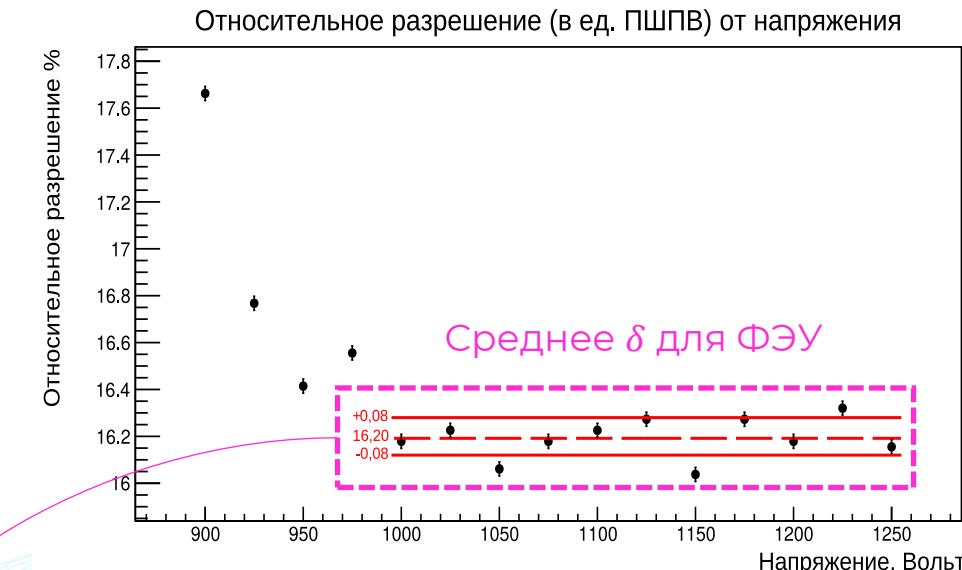
# Спектрометрические характеристики ФЭУ



Подгонка эмпирическим законом:

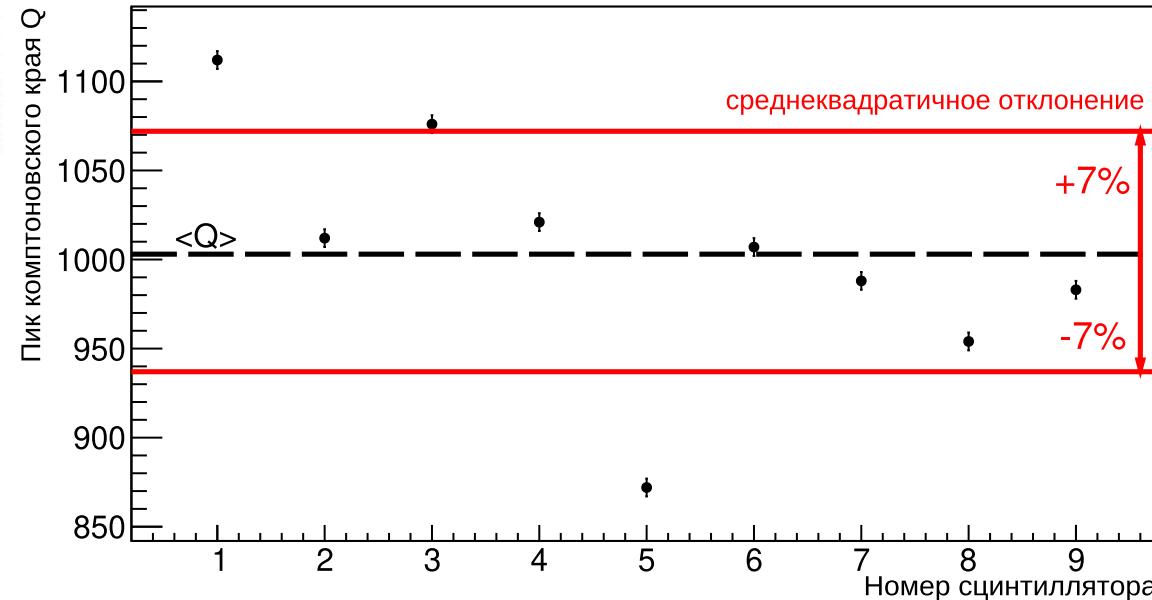
$$\mu = \frac{a^n}{(n+1)^{kn}} \cdot U^{kn},$$

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

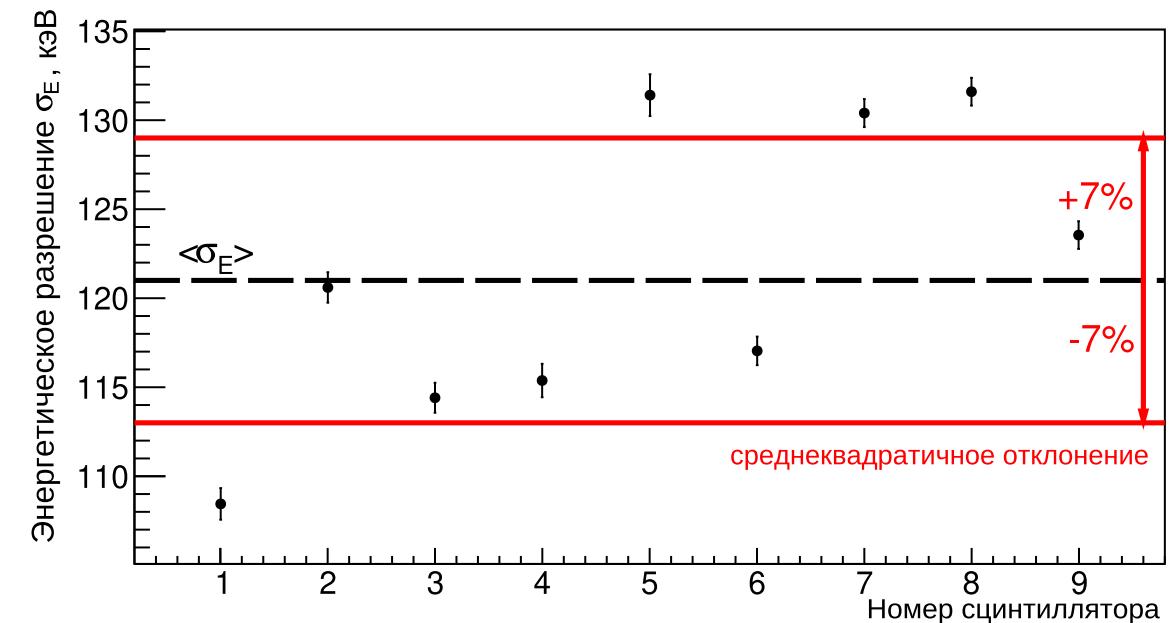


Разброс средних  
относительных  
разрешений ФЭУ

# Спектрометрические характеристики сцинтилляторов



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

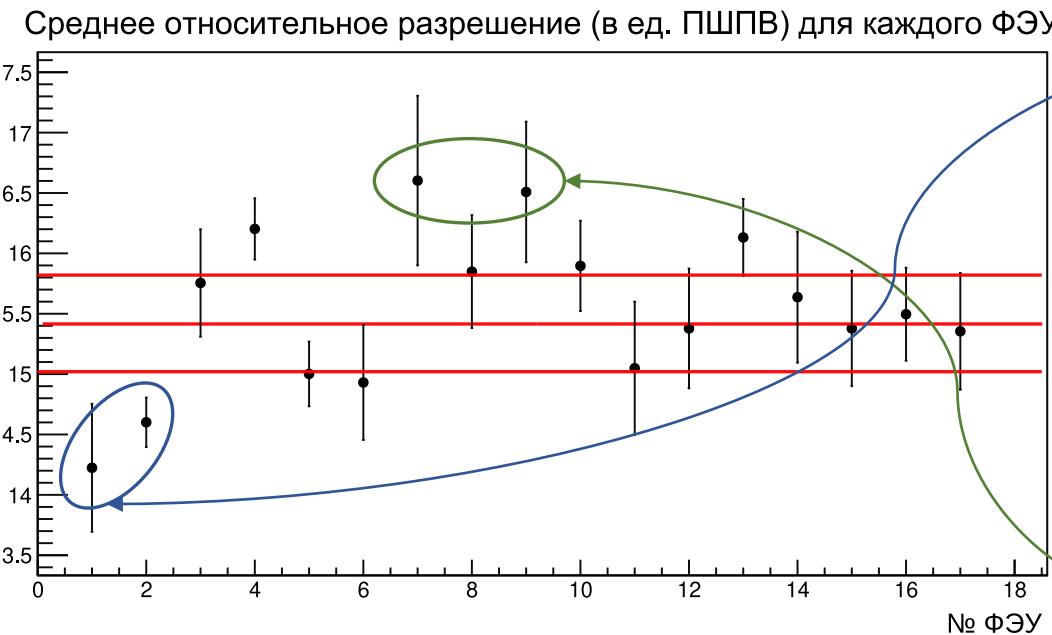


Разброс энергетических разрешений  $\sigma_E$  (в ед. ПШПВ) на линии  $E_e = 0.477$  МэВ для 9 сцинтилляторов

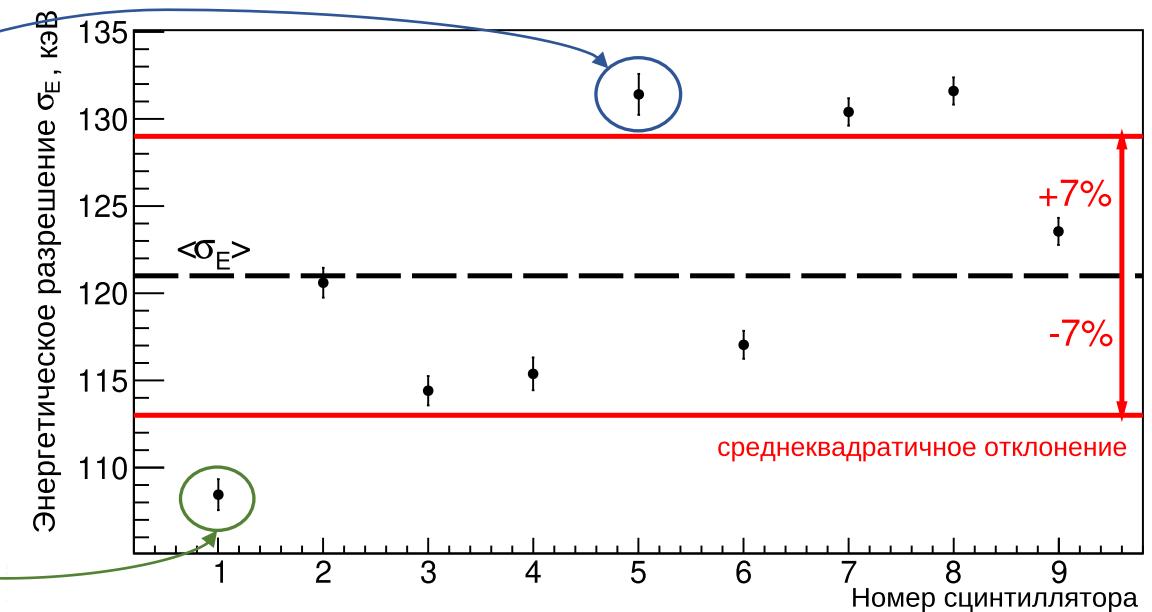
# Оптимальная конфигурация модулей



1)



Разброс относительных разрешений ФЭУ

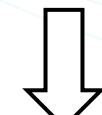


Разброс разрешений сцинтилляторов

“компенсация” разрешений ФЭУ и сцинтилляторов

2) выравнивание коэффициентов усиления ФЭУ на каждом модуле подстройкой напряжений

- нивелирование негативного вклада в абсолютное суммарное разрешение модуля
- минимизация неоднородности светособирания



*min* разброс спектрометрических характеристик модулей

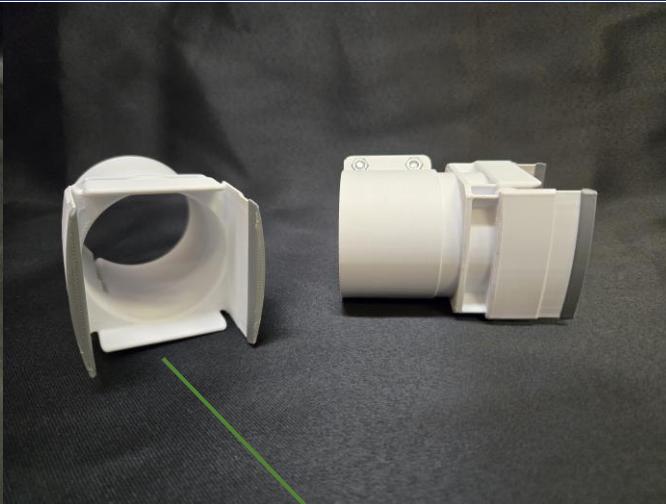
# Сборка модулей-спектрометров



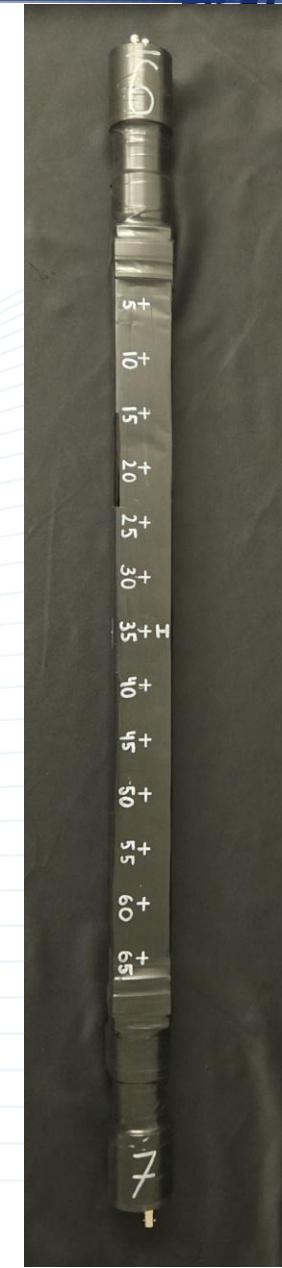
Светоизолированный ФЭУ

Крепеж для ФЭУ и сцинтиллятора

Светоизолированный  
пластиковый сцинтиллятор



Светоизолированный  
модуль



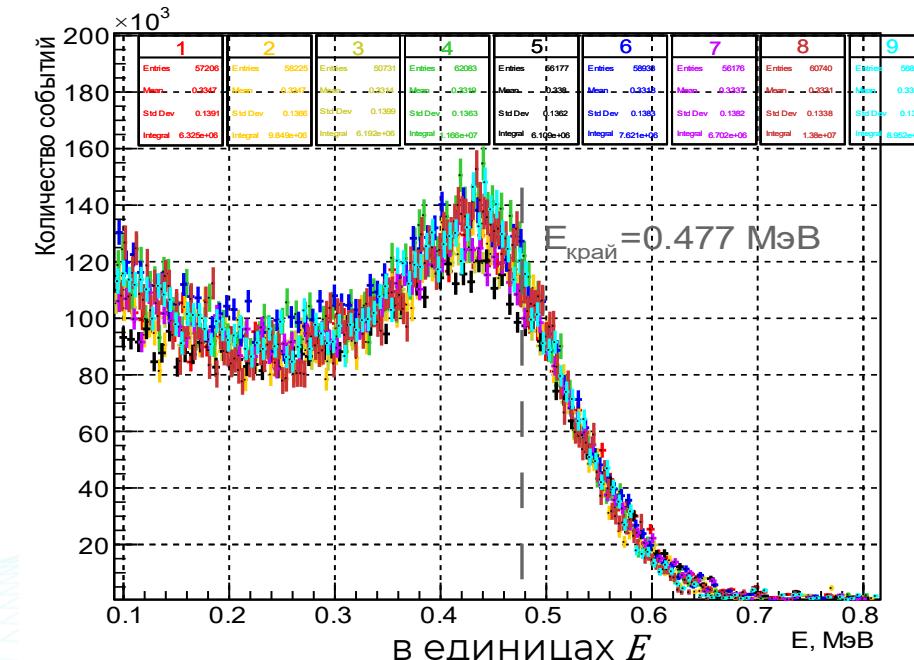
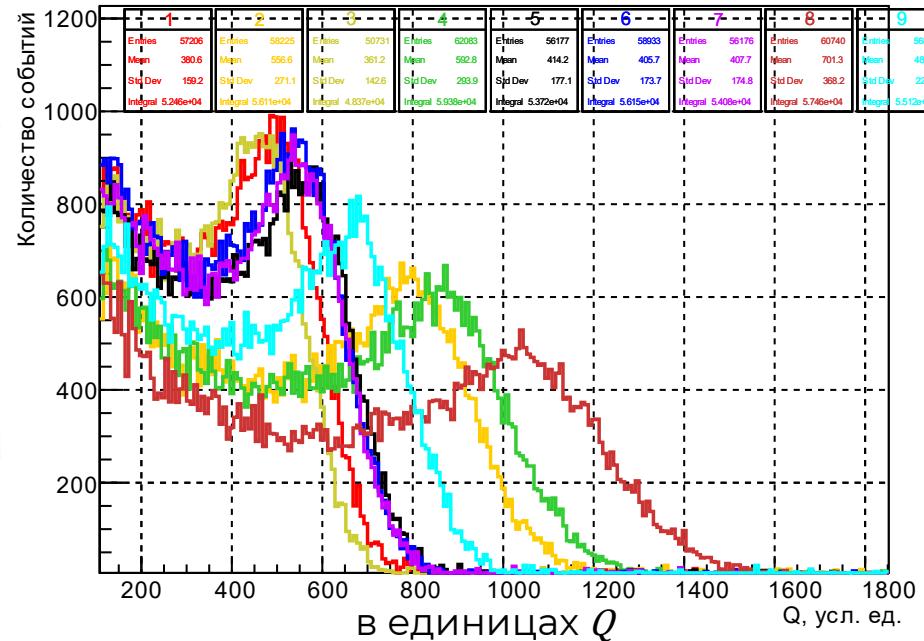
# Блок модульного детектора



\* в данной работе не использовался



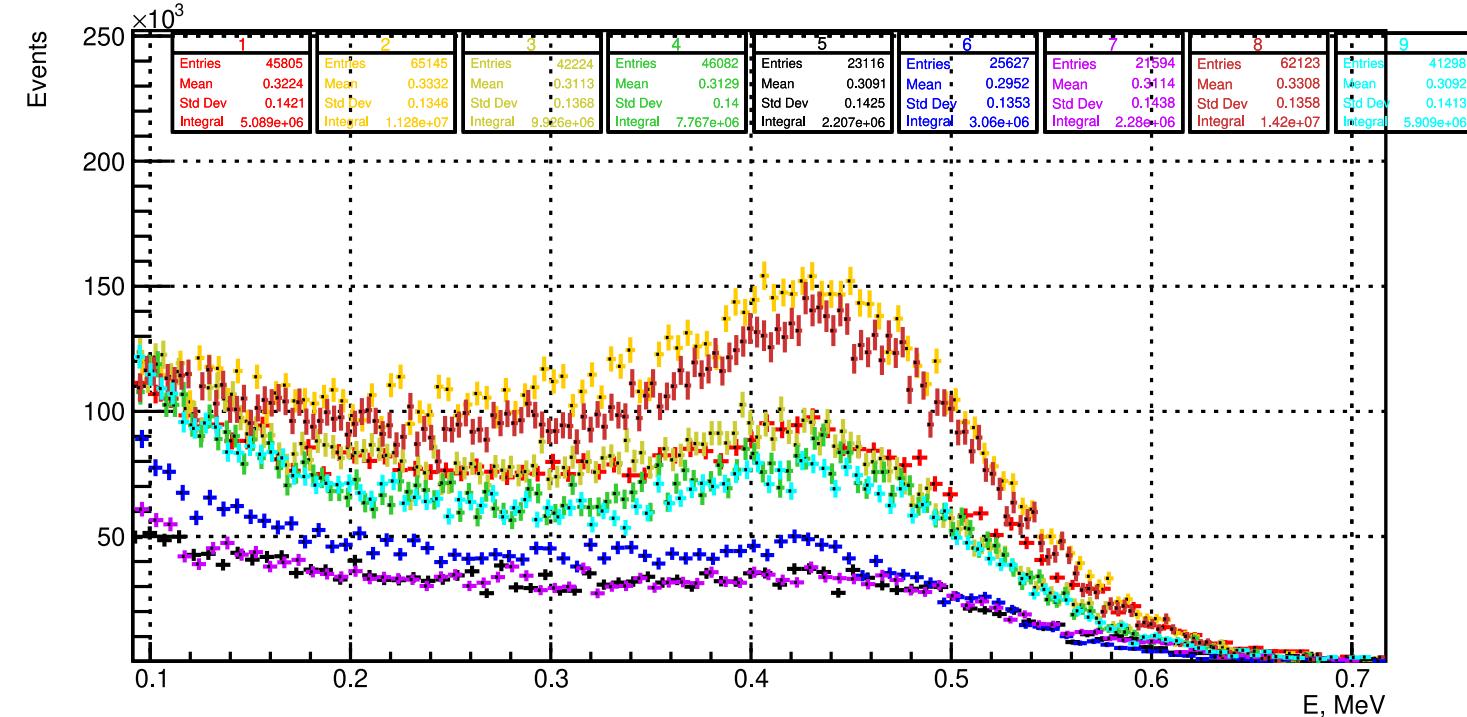
# Энергетическая калибровка модулей



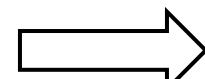
Аппаратурные кривые отклика модулей на  $\gamma$ -источник Cs-137 в точке 35 см.

Относительное разрешение модулей для энергии 1 МэВ

№ модуля	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\delta(1 \text{ МэВ}), \%$	7,5	6,1	7,1	5,8	7,2	6,9	7,4	5,2	5,7
$\Delta\delta, \%$	0,6	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,4	0,5



Геометрия модулей с учетом энергетического разрешения: чем хуже, тем дальше от центра



Разница в высоте спектров  
соответствует геометрическому  
расположению модулей в сборке\*

\* при измерении 8-го модуля АЦП часть времени был в режиме *busy*



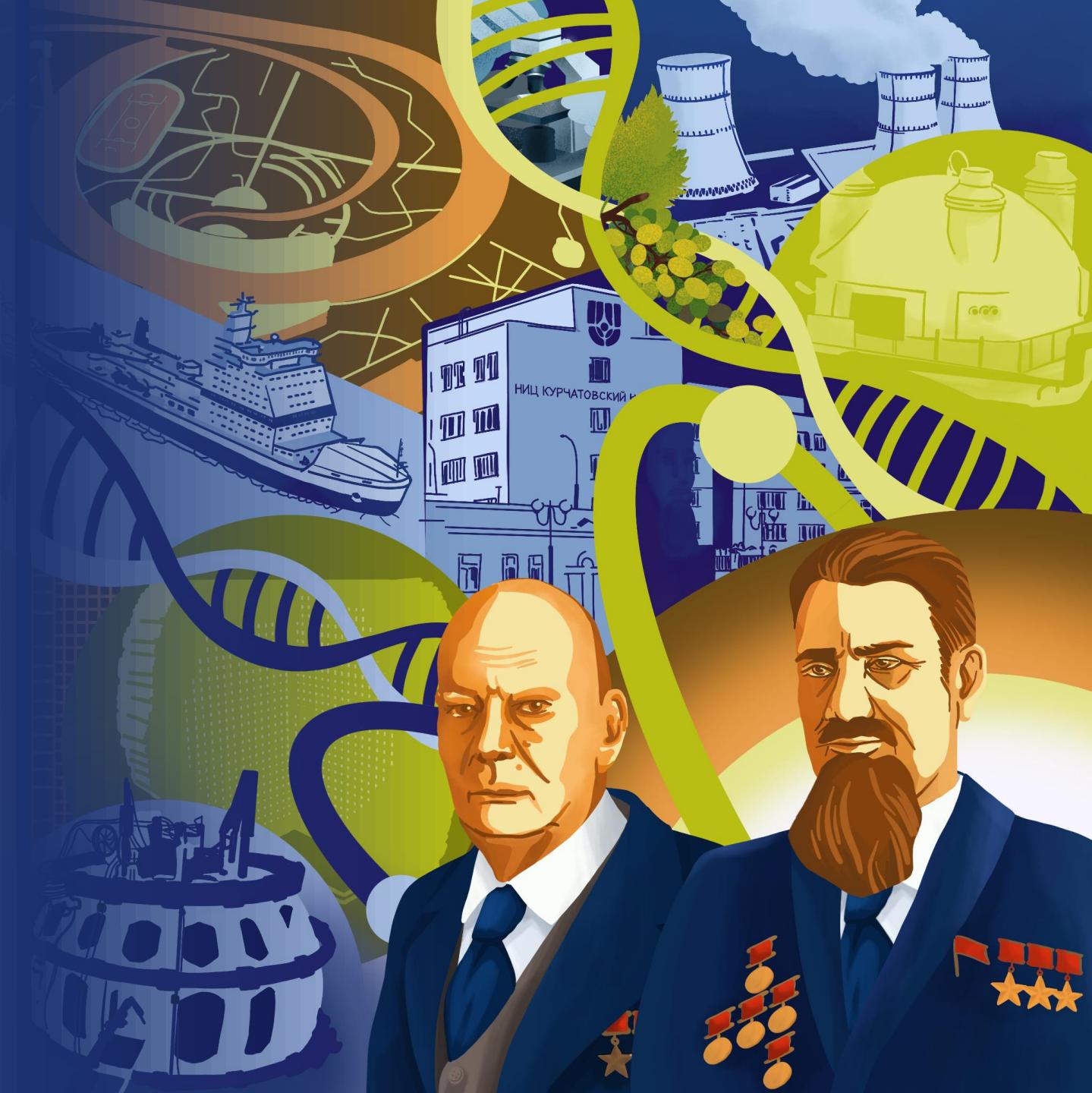
В данной работе разработан сцинтиляционный спектрометр на основе органического пластикового сцинтиллятора для детектирования реакторных антинейтрино. В ходе работы получены следующие результаты:

- Подобрана оптимальная конфигурация (с точки зрения энергетического разрешения) спектрометрических модулей;
- Разработана конструкция модуля и блока детектора, представляющего собой набор модулей;
- Модули детектора собраны и светоизолированы, проведена их энергетическая калибровка;
- Собран блок детектора.



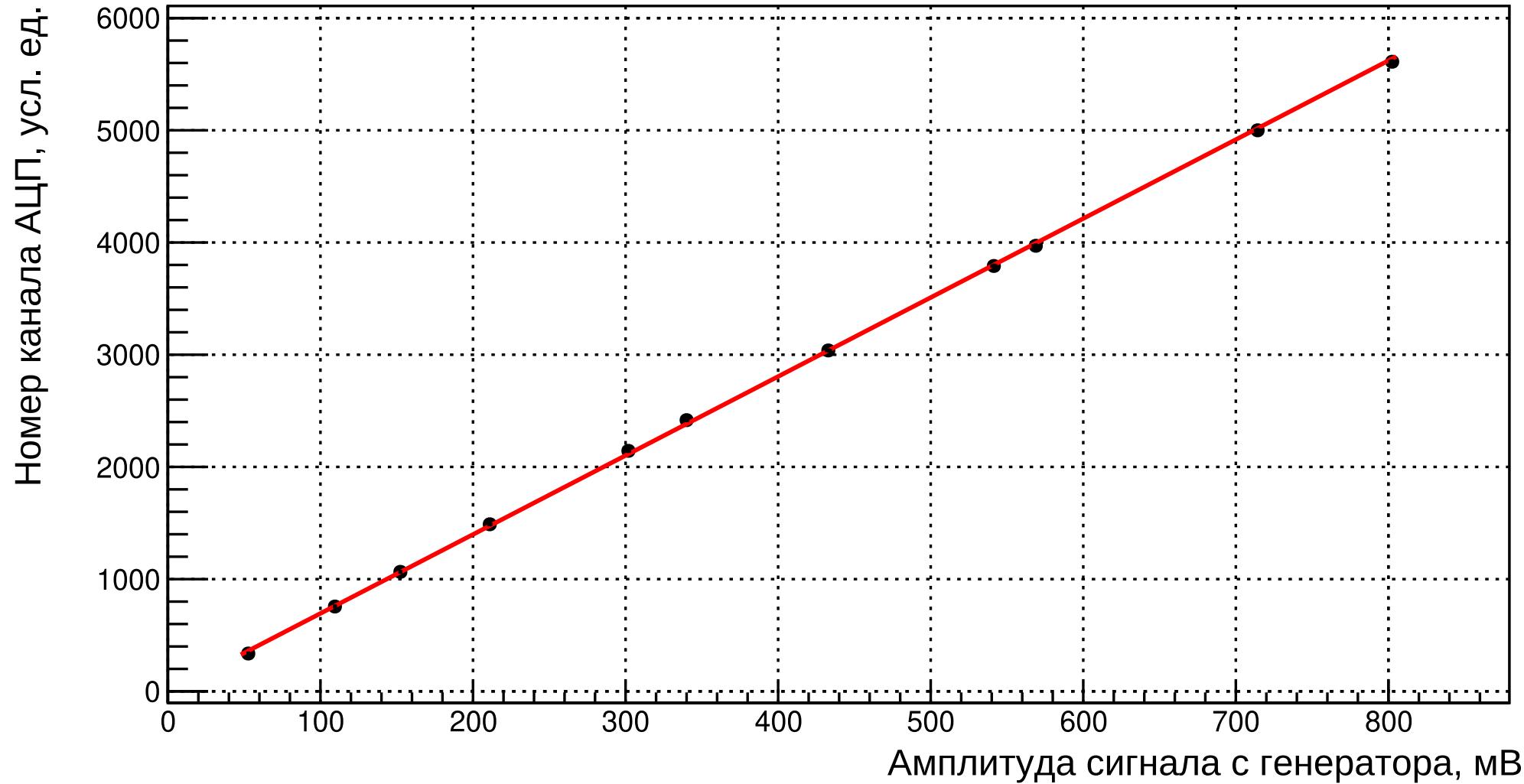
НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Спасибо за  
внимание!



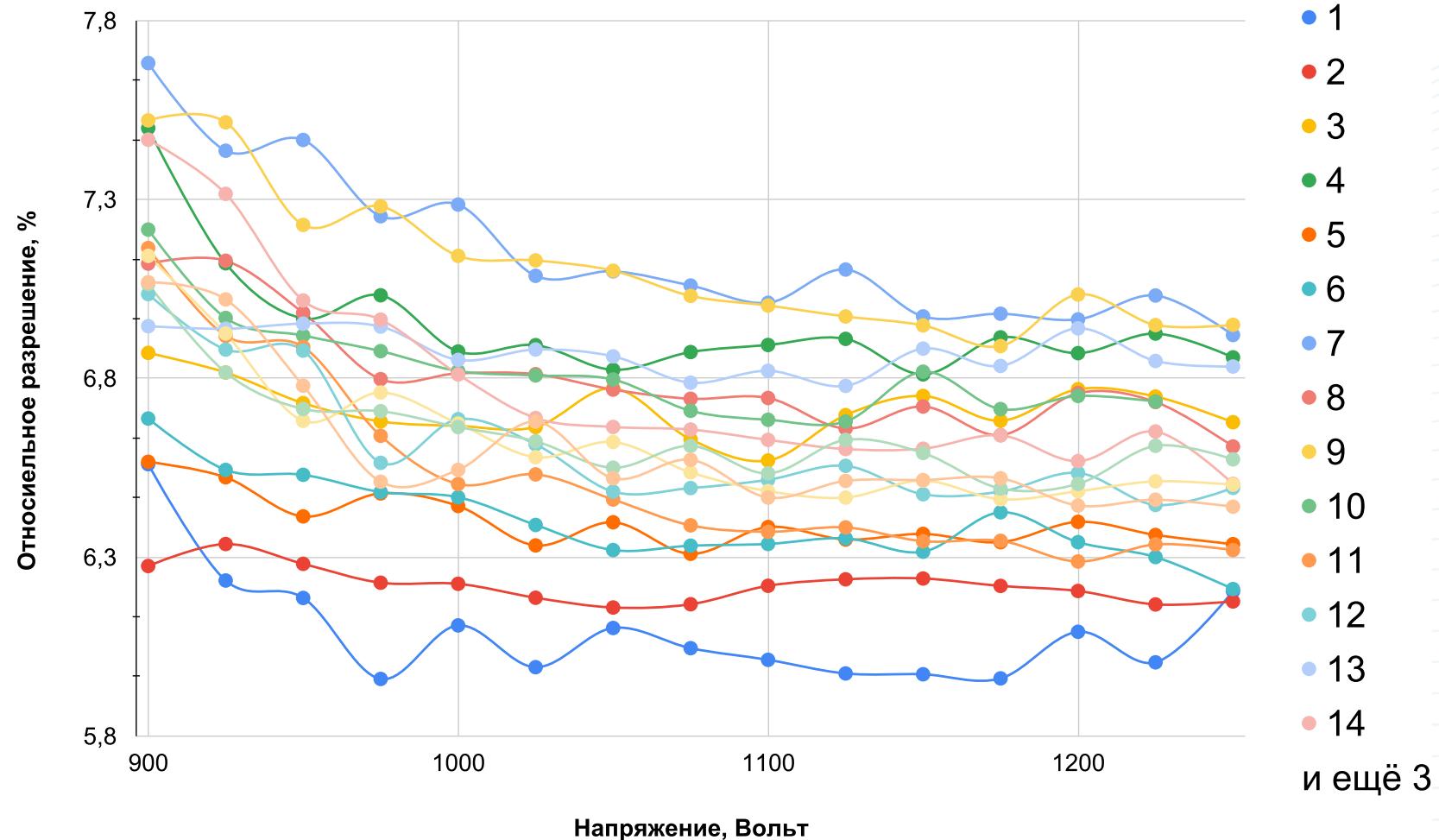


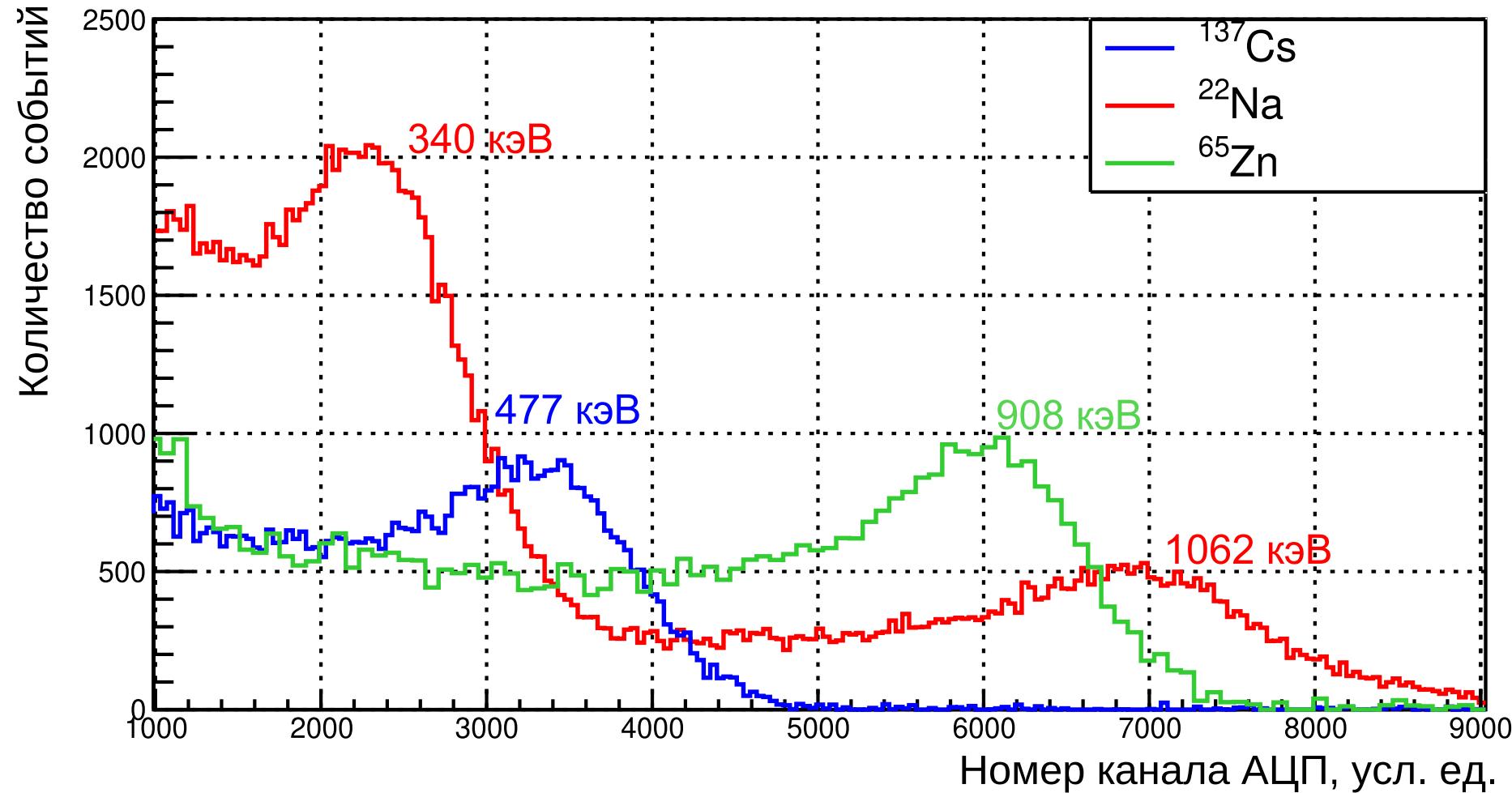
## Линейность АЦП



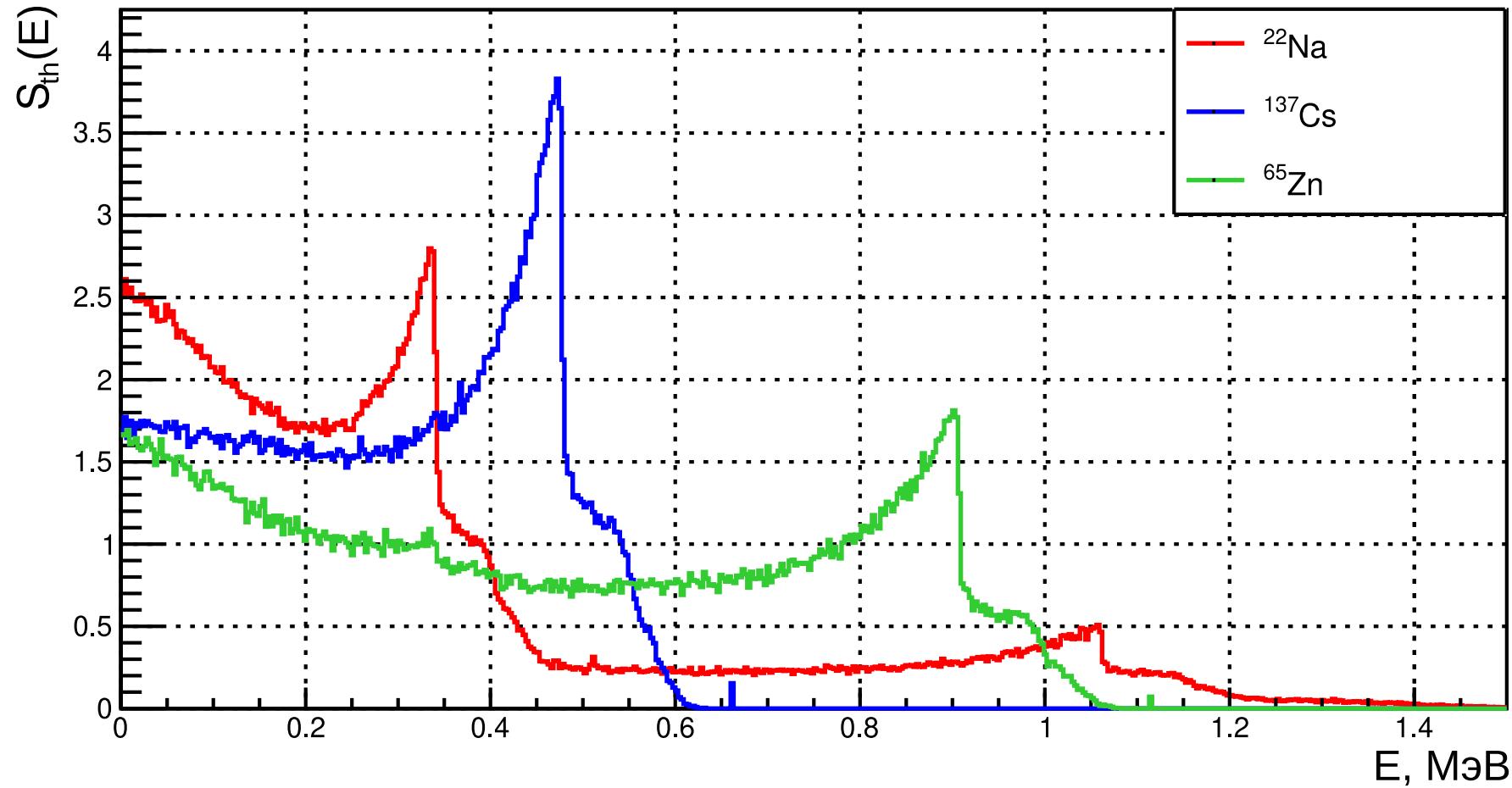


Зависимость отклика ФЭУ от напряжения

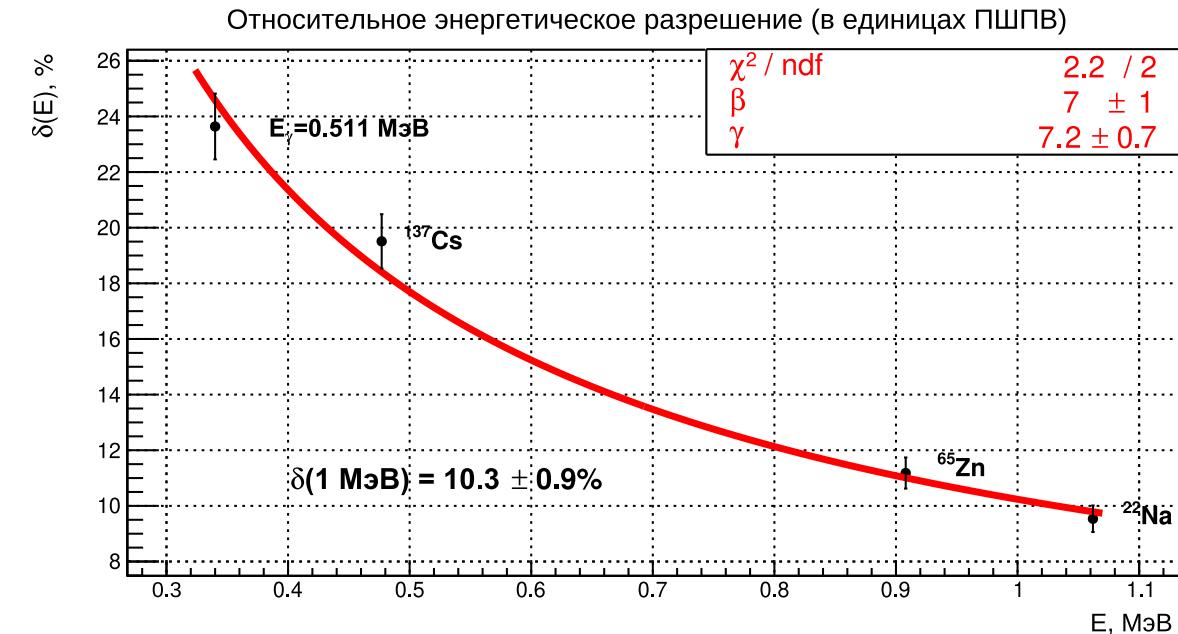
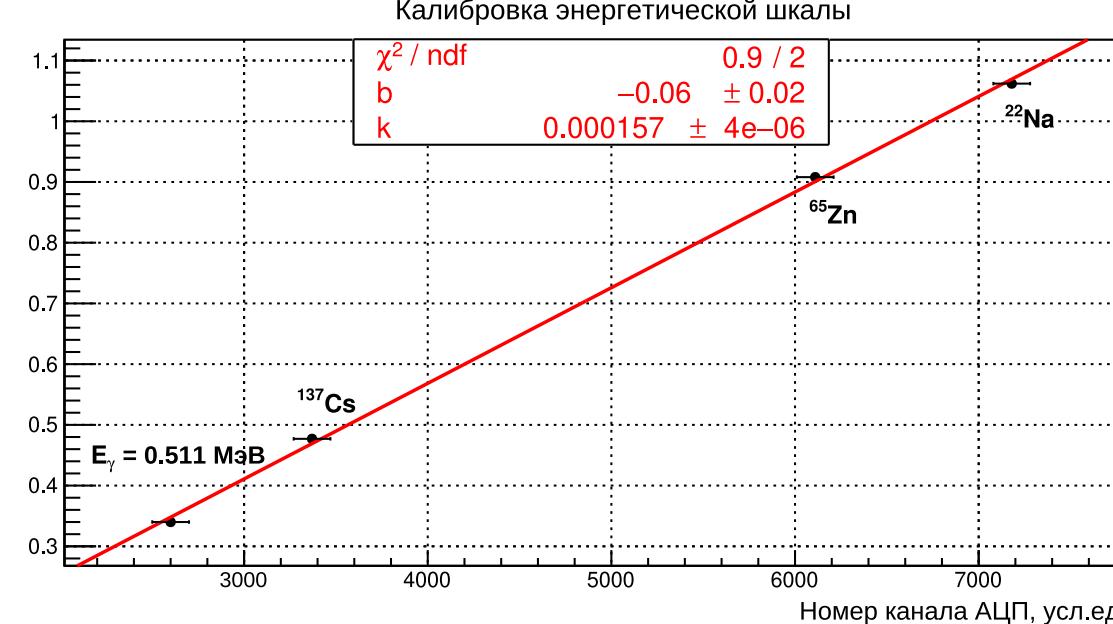




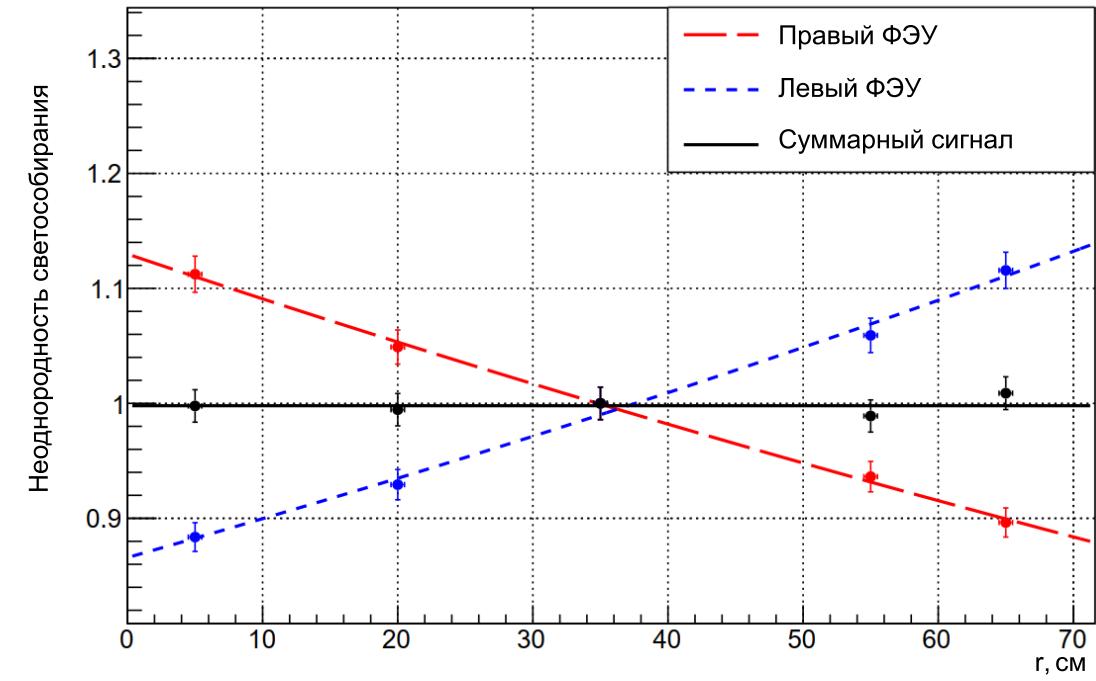
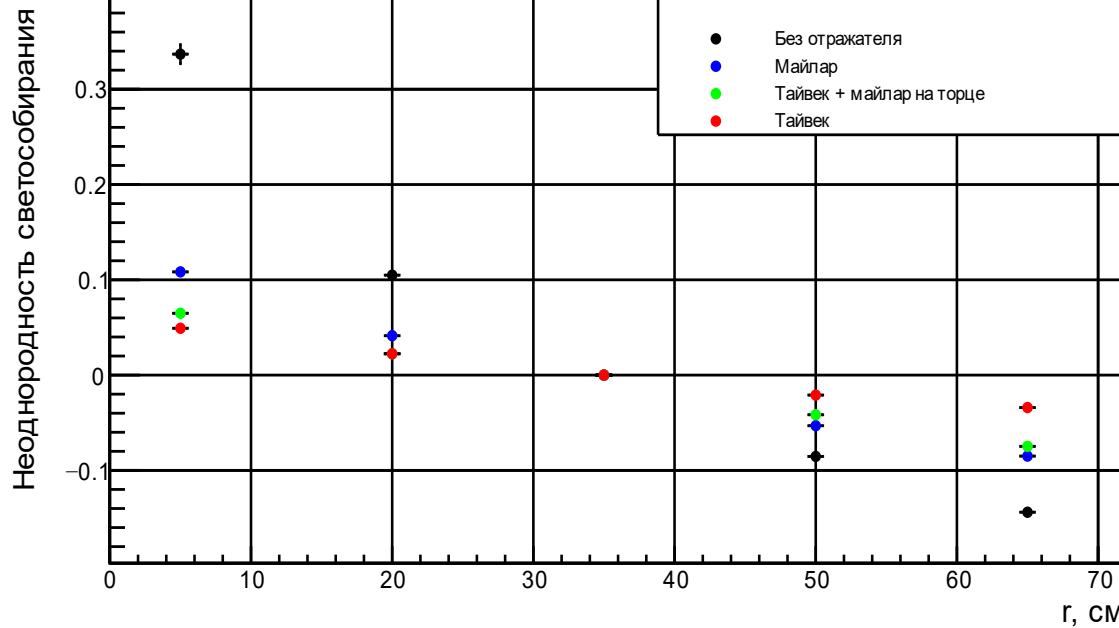
Аппаратурные кривые спектрометра для  $^{137}\text{Cs}$  (красная),  $^{60}\text{Co}$  (синяя) и  $^{22}\text{Na}$  (зеленая)



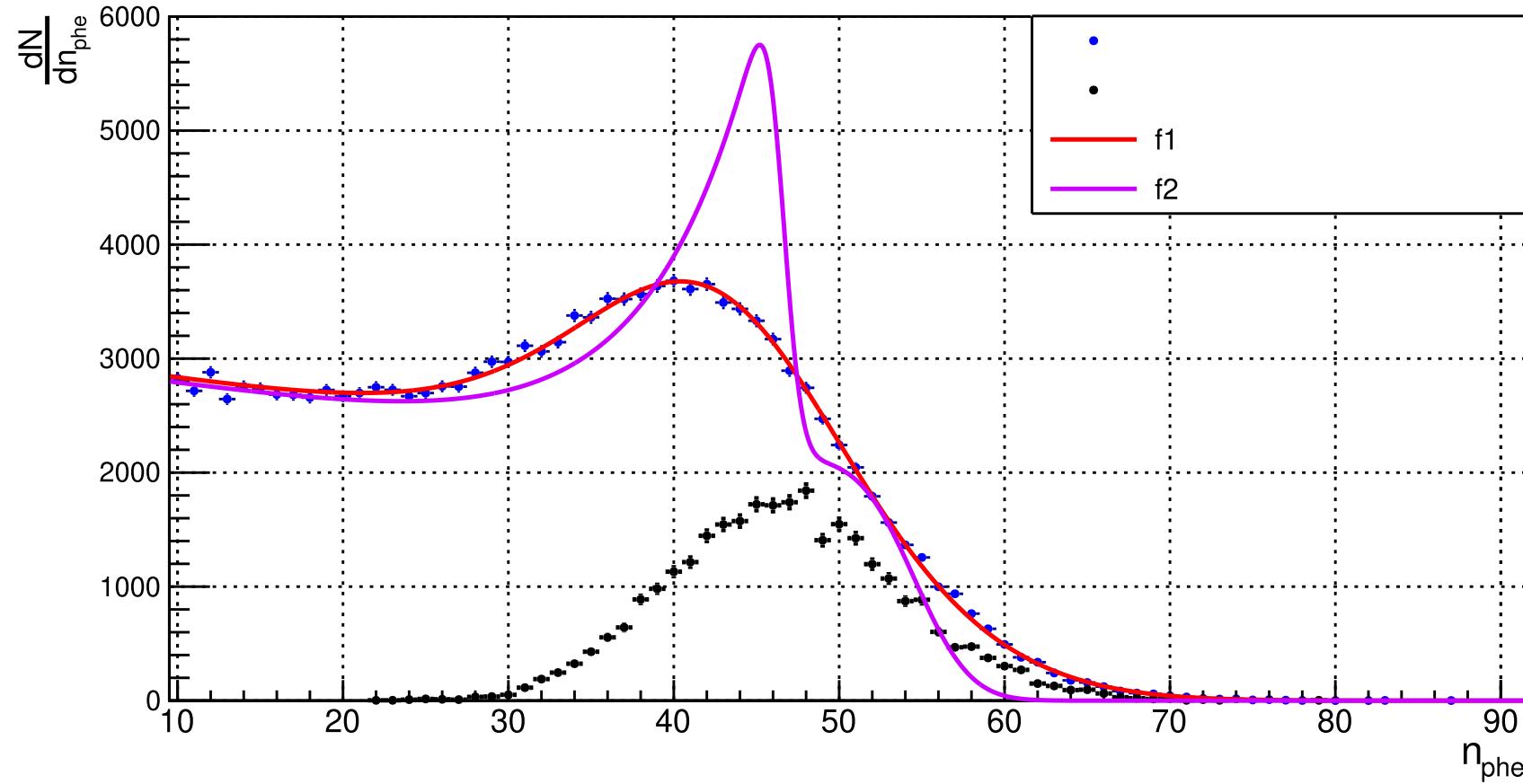
# Дополнительные слайды: энергетическая шкала и относительное разрешение



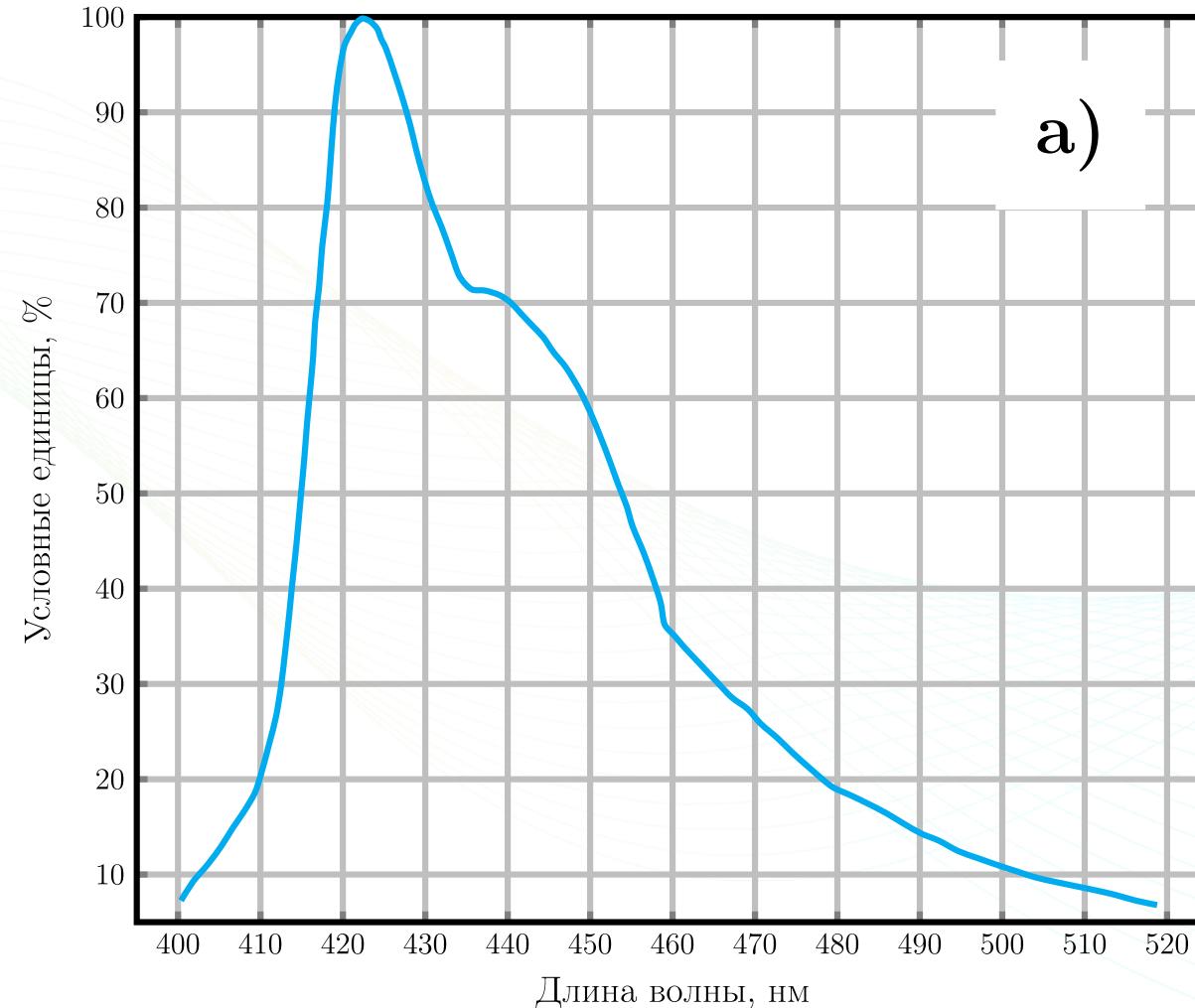
# Дополнительные слайды: неоднородность светособирания и сравнение отражателей



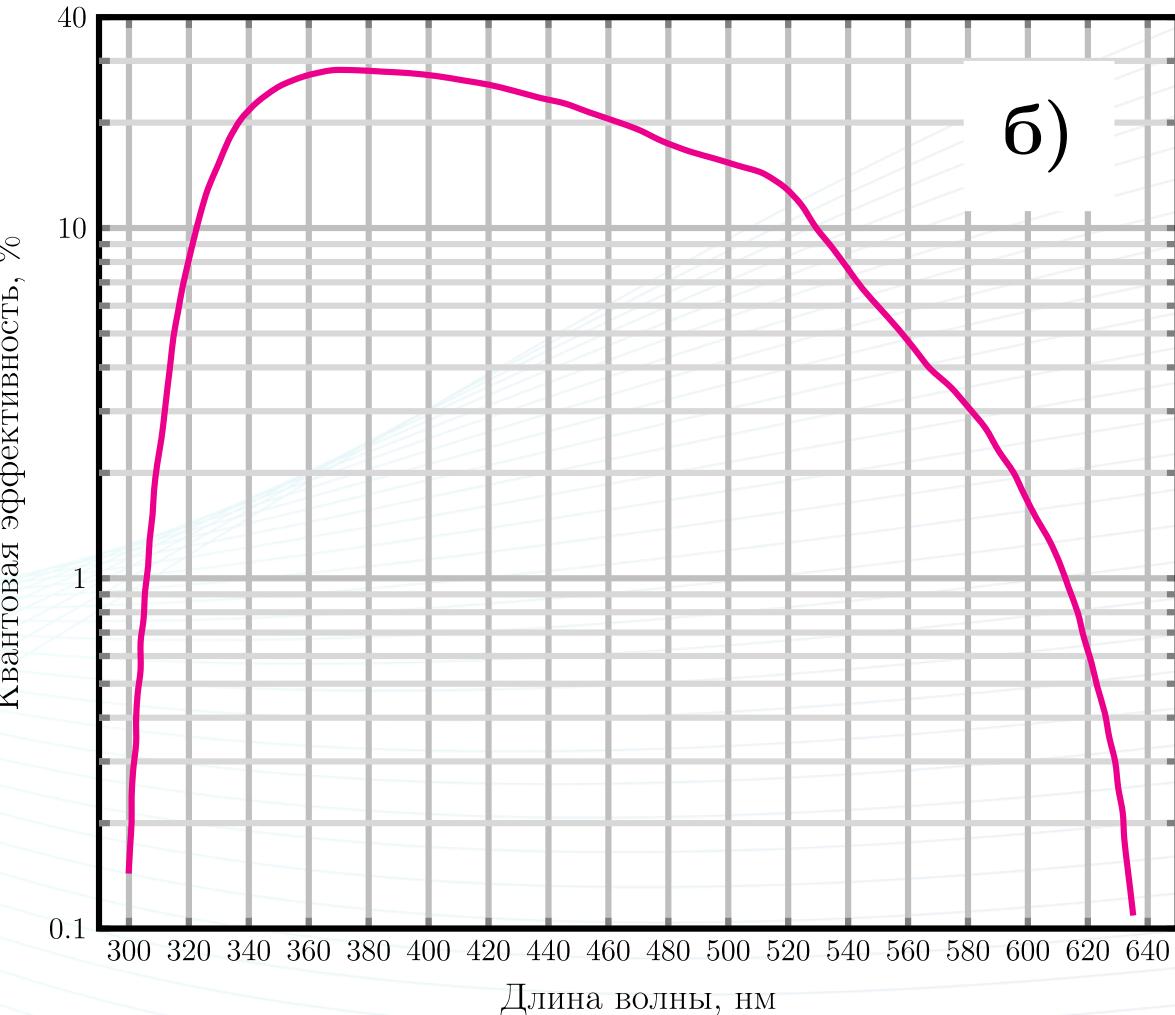
Дополнительные слайды:  
спектры с разыгранными моно-электронами с энергией комп. края



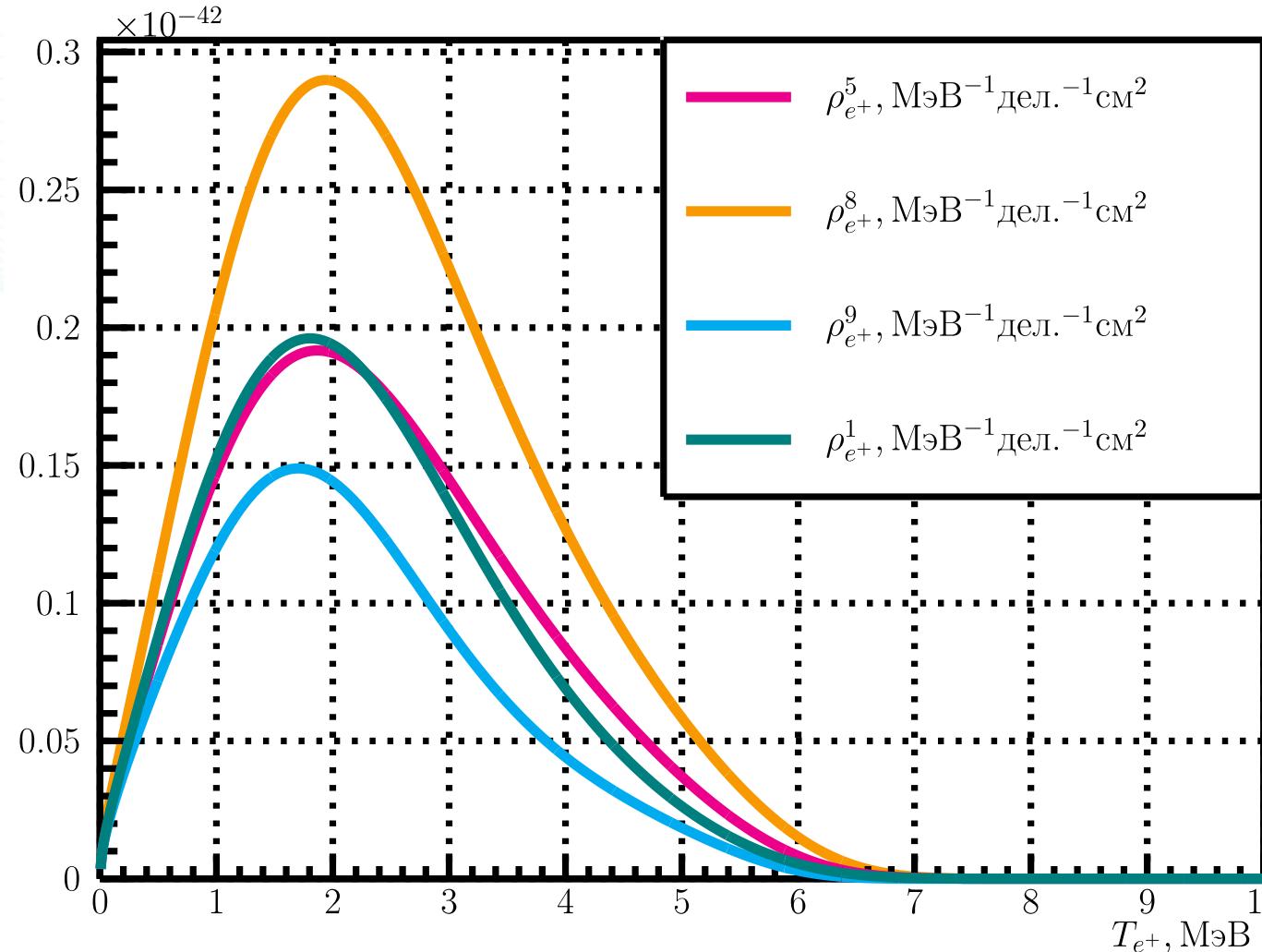
# Дополнительные слайды: спектры эмиссии сцинтиллятора и поглощения ФЭУ



Спектр высвечивания пластикового сцинтиллятора



Спектр поглощения ФЭУ, нормированный на квантовую эффективность



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

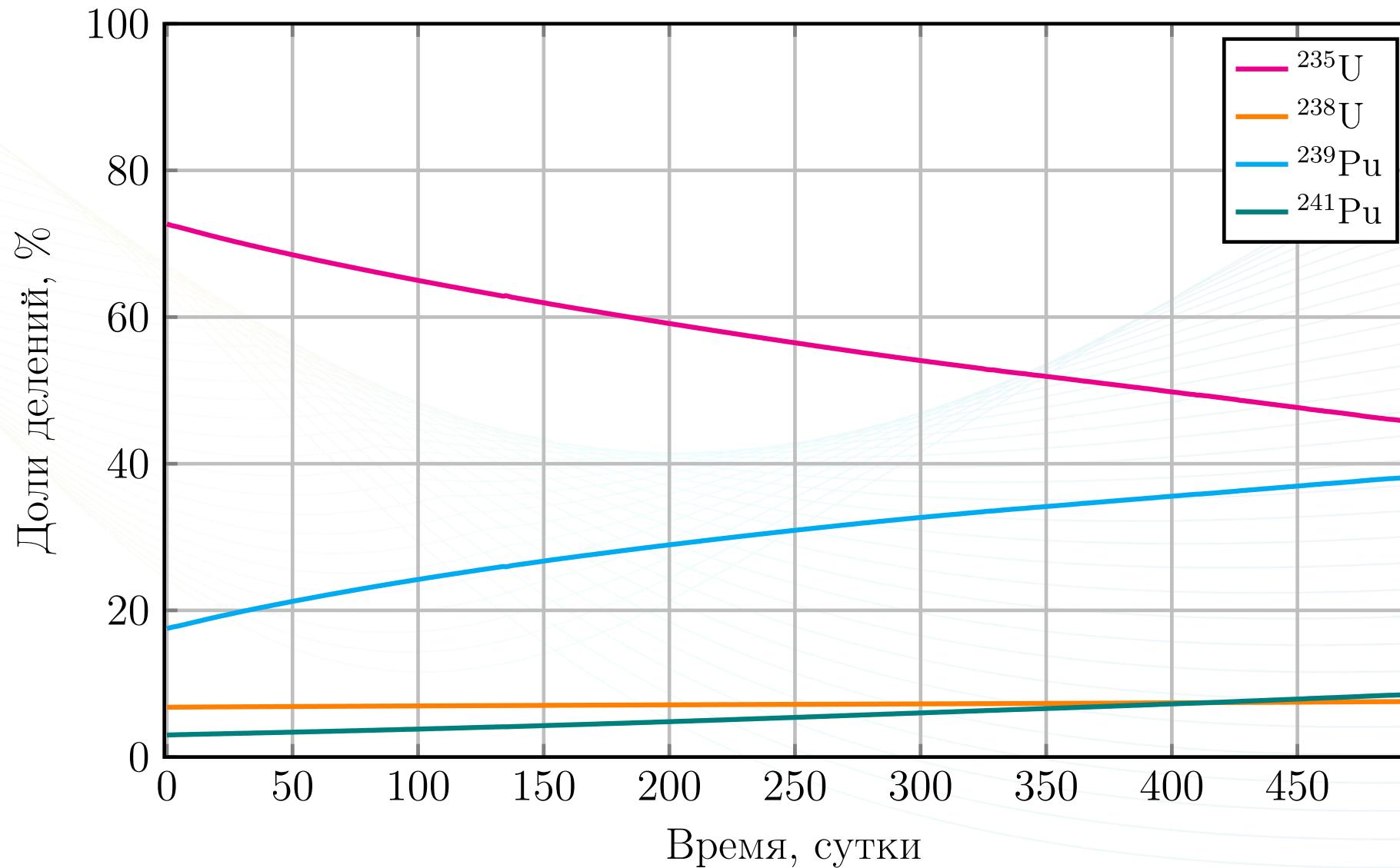




Таблица 1.2 — Различные методы детектирования реакторных  $\bar{\nu}_e$  [37]. СС (NC) обозначает взаимодействие по заряженному току (нейтральному току). Сечение усреднено по всему спектру энергии  $\bar{\nu}_e$ .  $N$  и  $Z$  — число нейтронов и протонов в ядре рабочего вещества соответственно. Для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

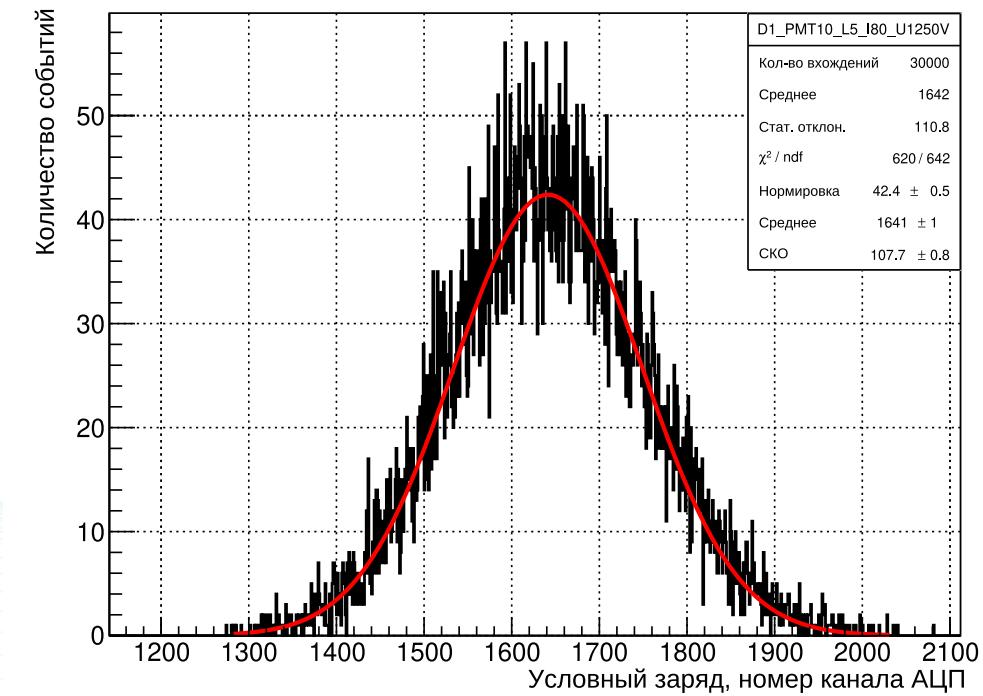
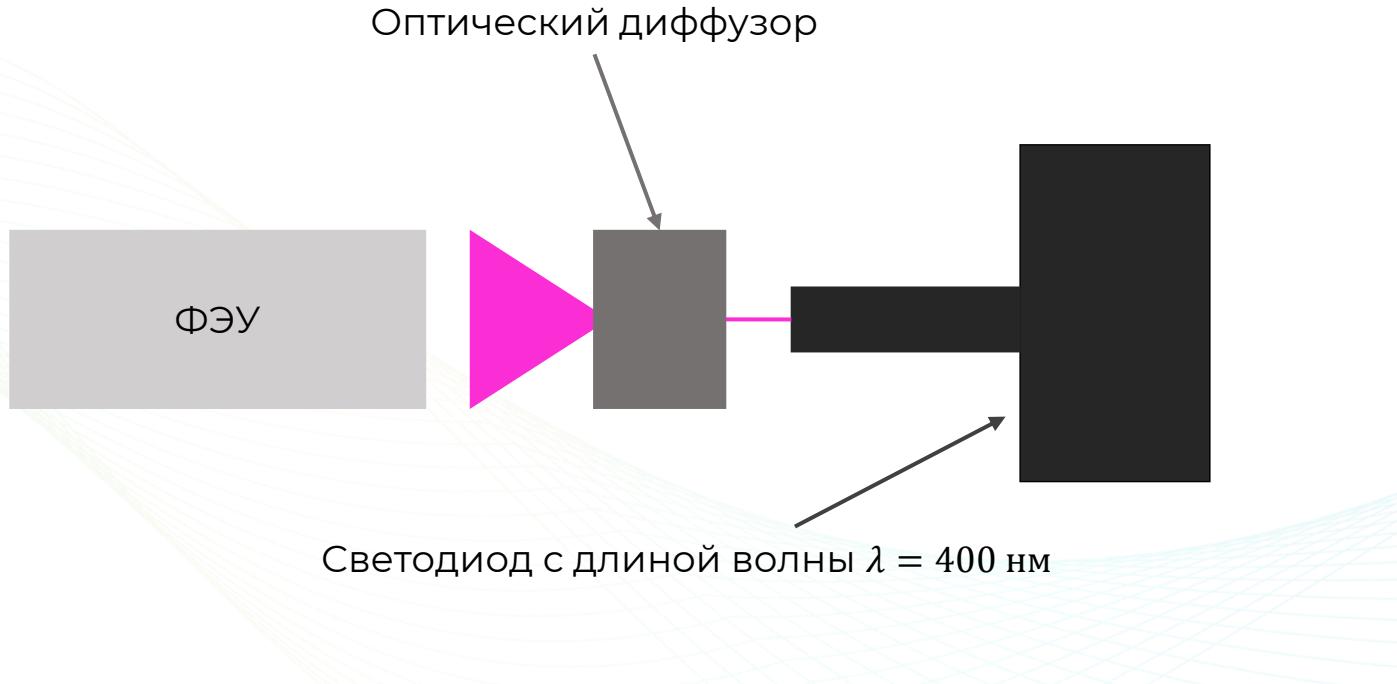
Реакция	Тип взаимодействия	Сечение реакции ( $10^{-44} \text{ см}^2/\text{деление}$ )	Порог (МэВ)
$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	CC	~63	1.8
$\bar{\nu}_e + d \rightarrow n + n + e^+$	CC	~1.1	4.0
$\bar{\nu}_e + d \rightarrow n + p + \bar{\nu}_e$	NC	~3.1	2.2
$\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow \bar{\nu}_e + e^-$	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  $\gamma$ -квантами. В реакциях с Cd и Gd образуется большое количество  $\gamma$ -квантов, поэтому для данных реакций в скобках указана суммарная уносимая энергия  $\gamma$ -квантами.

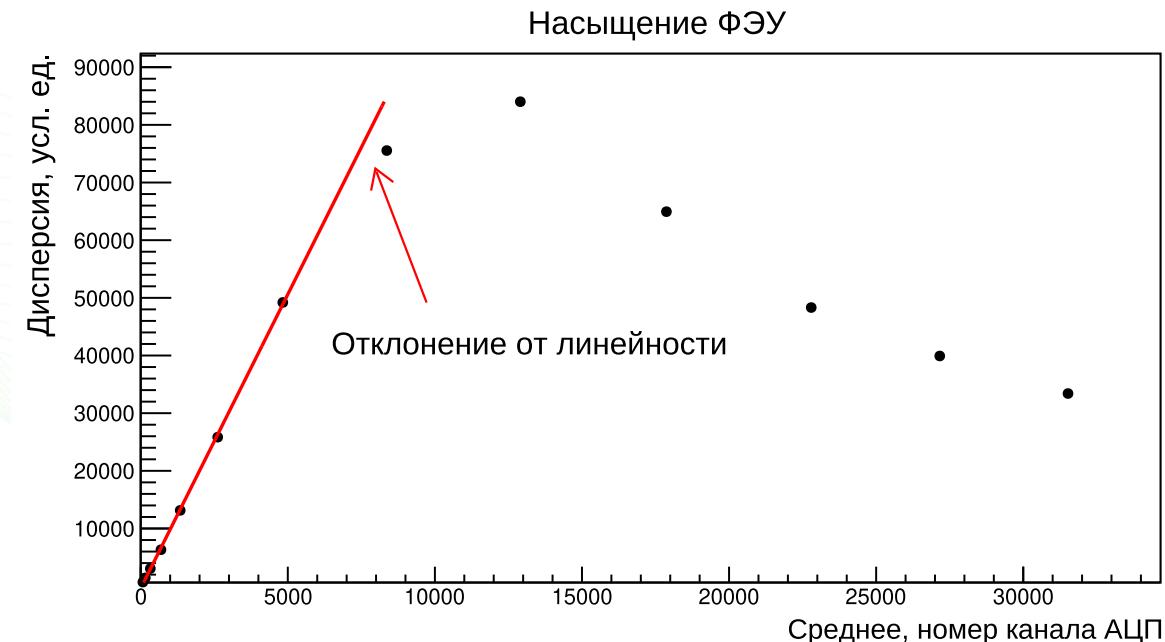
Мишень	Реакция	Сечение реакции (барн) для теплового нейтрона
H	$n + p \rightarrow d + \gamma$ (2.2 МэВ)	$\sim 0.33$
$^3\text{He}$	$n + ^3\text{He} \rightarrow p + ^3\text{H} + 0.764$ МэВ	$\sim 5300$
$^6\text{Li}$	$n + ^6\text{Li} \rightarrow \alpha + ^3\text{H} + 4.8$ МэВ	$\sim 950$
$^{10}\text{B}$	$n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



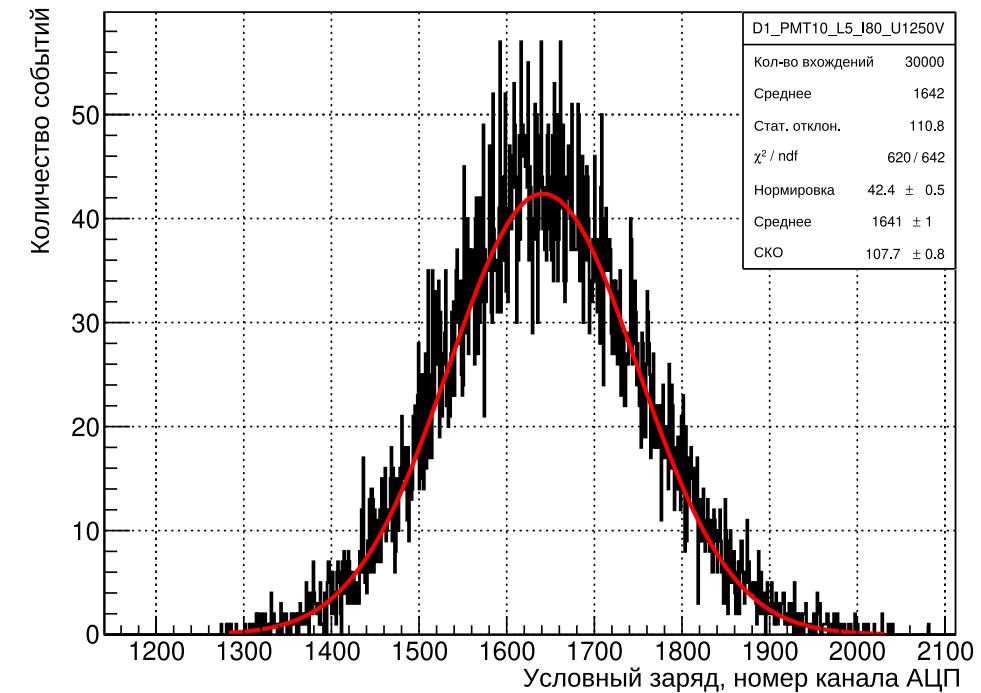
Аппаратурная кривая отклика ФЭУ  
(гауссиана)

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**.



Зависимость дисперсии кривой отклика ФЭУ от среднего.



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

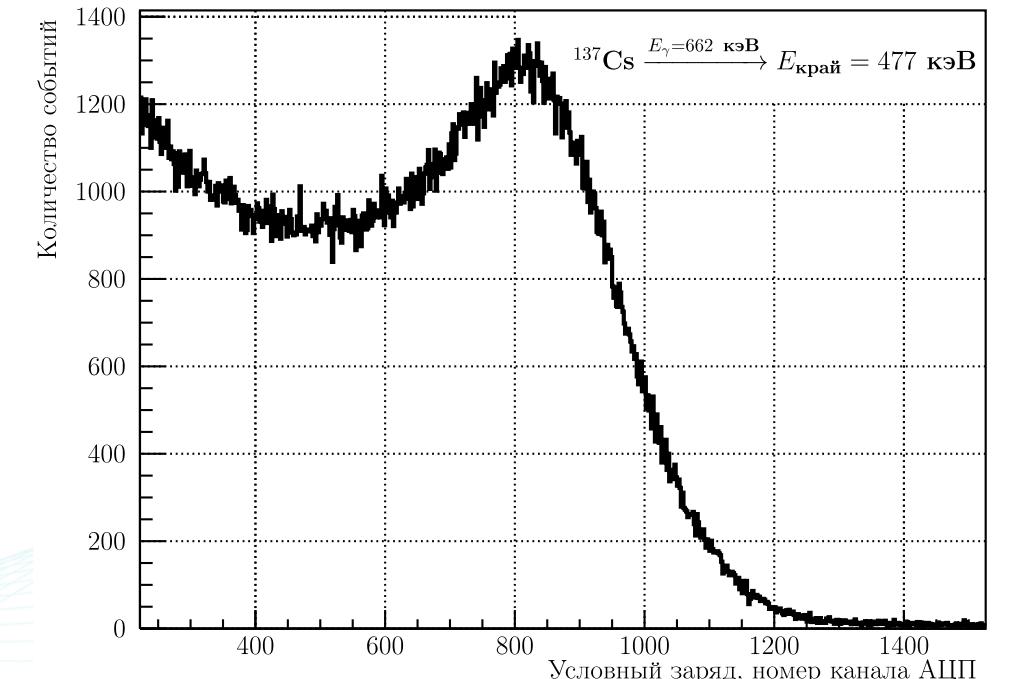
Отклонение от линейности: амплитуды сигналов – 600 мВ  $\sim$  5000 номер канала.

**Все дальнейшие измерения проводились в рабочем диапазоне амплитуд**

# Дополнительные слайды: Определение спектрометрических характеристик пластиковых сцинтилляторов



Процесс регистрации  $\gamma$ -излучения в пластиковом сцинтилляторе



Аппаратурная кривая отклика пластикового сцинтиллятора  
(комптоновское распределение)

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



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

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

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

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

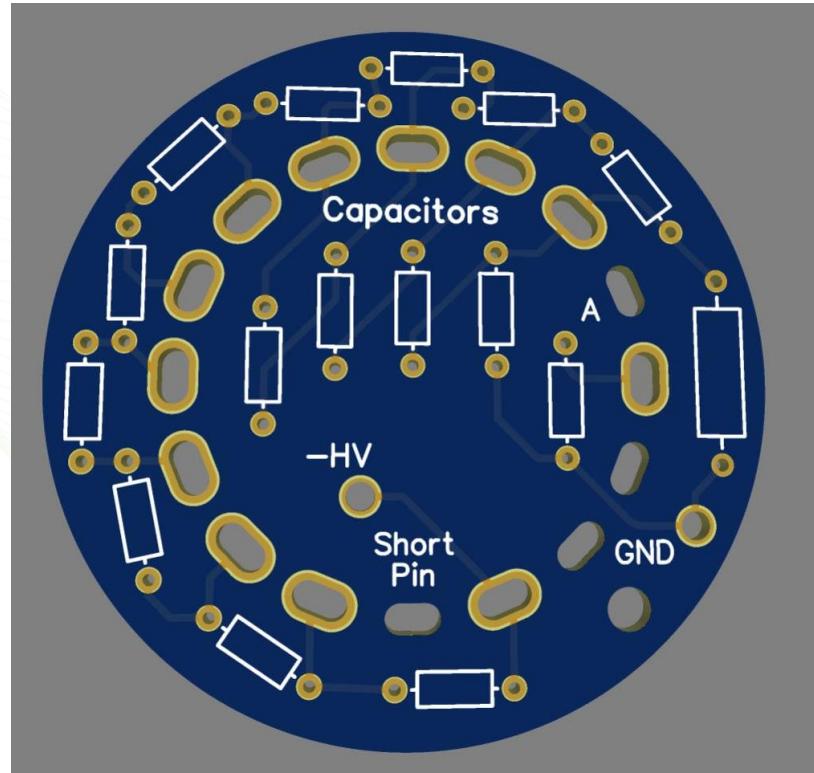
$E_{\text{рег.}} = k \cdot Q + b$ , где коэффициент  $b$  отвечает за смещение нуля по оси энергии;  $\sigma_E(E)$  –

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

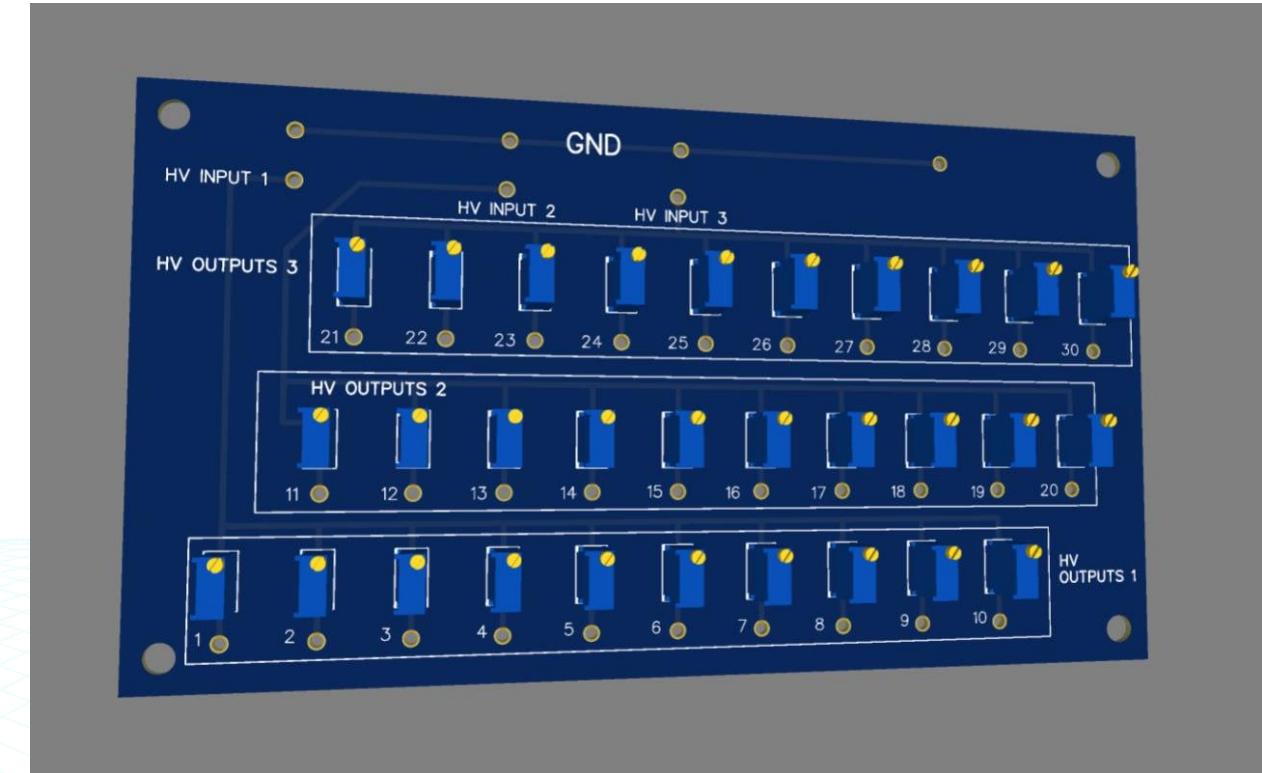
характеризующий неоднородность детектора;  $\beta$  – статистический параметр,

зависящий от числа фотоэлектронов;  $\gamma$  – параметр шумов электроники.

# Дополнительные слайды: Схема питания ФЭУ



Делитель напряжения



Разветвитель напряжения