

# Расчёт ожидаемого эффекта от упругого когерентного рассеяния реакторных антинейтрино в детекторах на основе неорганических сцинтилляторов

Научный руководитель: Литвинович Е.А.

(к.ф.-м.н., доц.)

Студент:

Крапля В.М.

Москва 2026г

# Введение

## Упругое когерентное рассеяние нейтрино (УКРН)

$$\frac{d\sigma}{dT} = \frac{G_F^2}{4\pi} M \left( 2 - \frac{MT}{E^2} \right) N^2$$

**Формула дифференциального сечения УКРН**, где

T – энергия отдачи ядра [кэВ]

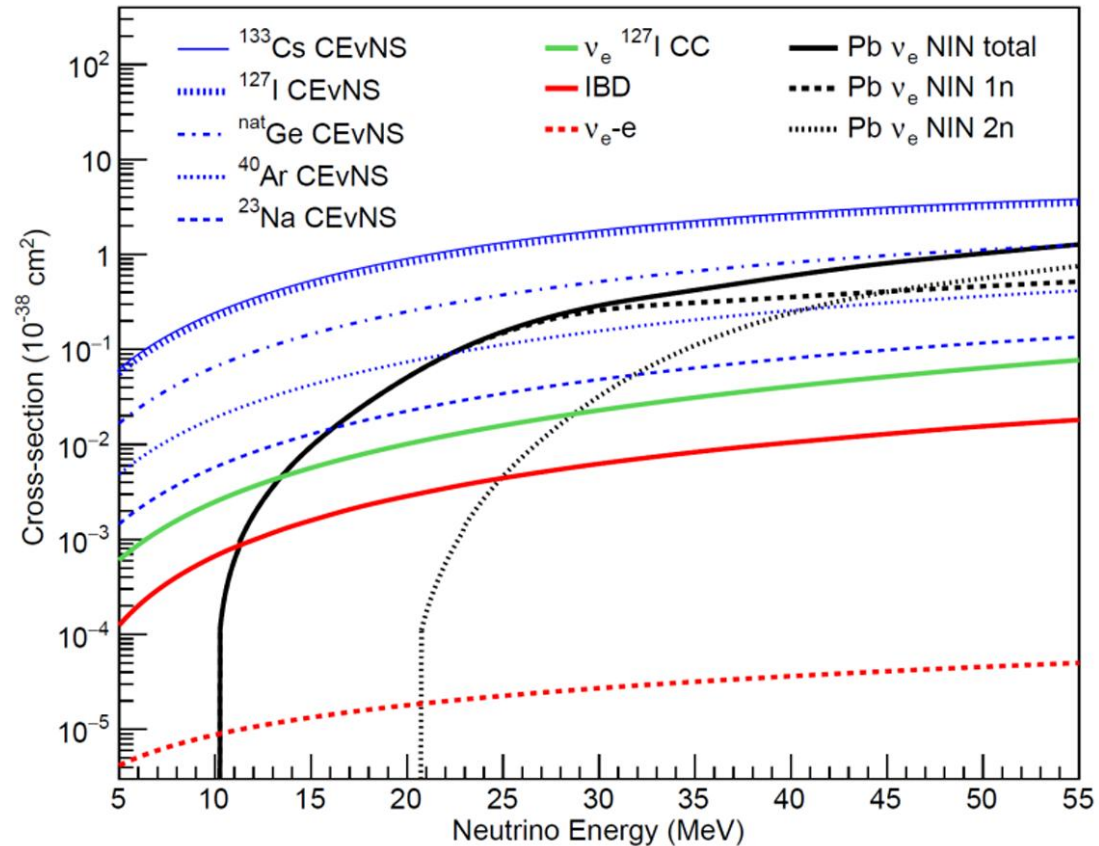
$G_f$  – постоянная ферми [ГэВ<sup>-2</sup>]

M – масса ядра [МэВ]

E – энергия нейтрино [МэВ]

N – число нейтронов

Требуется низкий порог детектирования (сотни Эв)



**Трудности при поиске УКРН**

Большие шумы в ROI

## Цель и задачи работы

- **Цель:** Расчёт эффекта от УКРН в детекторе на основе неорганических сцинтилляторов.
- **Задачи:**
  1. Изучить и систематизировать особенности детекторов УКРН;
  2. Разработать техническое предложение детектора на основе неорганического сцинтиллятора для поиска УКР реакторных антинейтрино на ядре;
  3. Разработать Монте-Карло модель детектора для изучения загрузки детектора обусловленной внешним  $\gamma$ -фоном в подреакторном помещении;
  4. Найти модель  $\gamma$ -фона в помещении 3А-121/1 на энергоблоке №3 КАЭС.

- **Возможность уточнения параметров физики в рамках Стандартной Модели (СМ):**
  - Электрослабый угол смешивания при низкой передаче импульса;
  - Магнитный момент нейтрино;
  - Распределение плотности нейтронов в ядре при когерентности процесса.
- **Поиск физики за рамками СМ при измерении УКРН реакторных антинейтрино:**
  - Нестандартные процессы образования нейтрино, с изменением аромата при его взаимодействии с другими фермионами;
  - Аномальные магнитные моменты нейтрино при полной когерентности взаимодействия;
  - Поиск стерильных нейтрино.
- **Создание компактных детекторов УКРН реакторных антинейтрино для мониторинга ядерных реакторов и обеспечения гарантий МАГАТЭ нераспространения ядерных материалов.**

# Расчет ожидаемого эффекта УКРН для разных сцинтилляторов

$$1) \frac{d\sigma}{dT} = \frac{G_F^2}{4\pi} M \left( 2 - \frac{MT}{E^2} \right) N^2$$

**Дифференциальное сечение УКРН**, где **M**-масса ядра, **T**-кинетическая энергия ядра отдачи, **G<sub>F</sub>**-постоянная Ферми, **E**-энергия налетающего нейтрино, **N**-число нейтронов.

$$2) \Phi_\nu(E_\nu) = \frac{1}{32} \times \frac{10^{20}}{4\pi L^2} \times f(E_\nu)$$

**Спектр потока реакторных антинейтрино**, где **L**-расстояние от детектора до центра активной зоны ядерного реактора, **f(E<sub>ν</sub>)**-энергетический спектр нейтрино.

$$3) \frac{dN}{dT} = N_\alpha \sum_i \int_{E_\nu^{min}}^{E_\nu^{max}} \Phi_i(E_\nu) \frac{d\sigma}{dT} dE_\nu$$

**Ожидаемый эффект УКРН**, где **N<sub>α</sub>**-количество ядер в мишени.

$$4) Q_i(E) \simeq \frac{1}{kB(dE/dr)_i}$$

**Квенч-фактор (модели Биркса)**, где **kB**-коэффициент Биркса для материала, **(dE/dr)<sub>i</sub>**-тормозящая способность материала для ионов.

# Расчет ожидаемого эффекта УКРН для разных сцинтилляторов

## Световыходы сцинтилляторов:

$Y_{\text{NaI}} = 25$  фотонов/кэВ,       $Y_{\text{CaWO}_4} = 15.8$  фотонов/кэВ  
 $Y_{\text{GAGG}} = 30$  фотонов/кэВ,       $Y_{\text{BGO}} = 10$  фотонов/кэВ  
 $Y_{\text{PbWO}_4} = 0.3$  фотонов/кэВ,       $Y_{\text{LYSO}} = 22$  фотонов/кэВ

Рис.1 Сравнение результата расчета с NEON

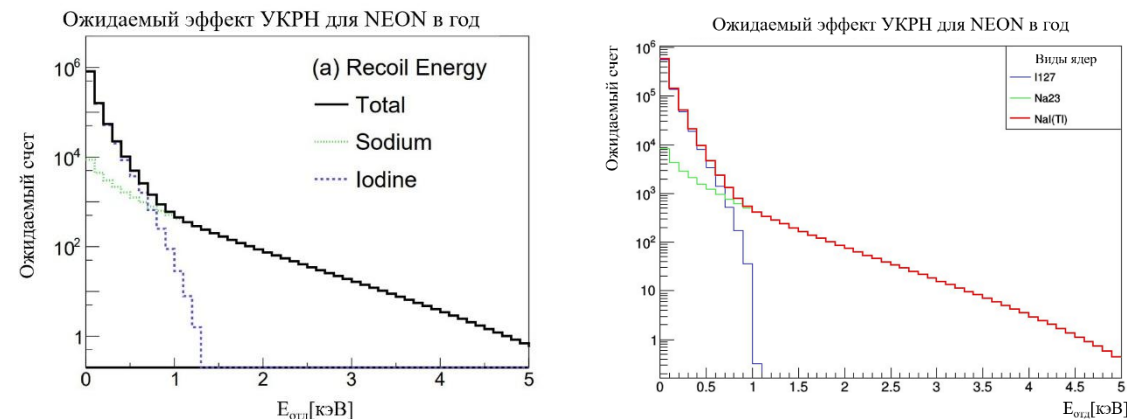


Рис.2 Эффект УКРН для NaI(Tl), GAGG, BGO, LYSO, с учетом квенч-фактора

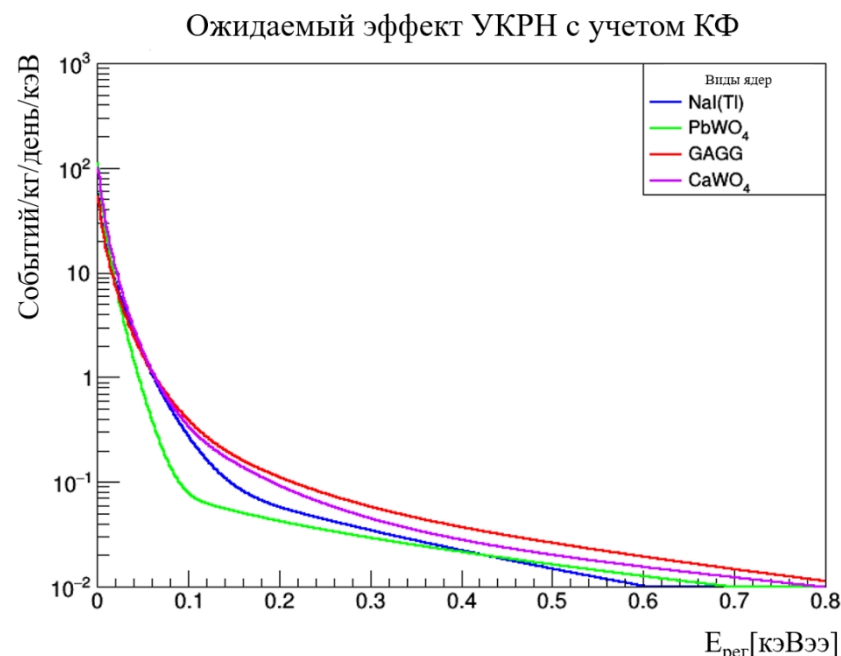
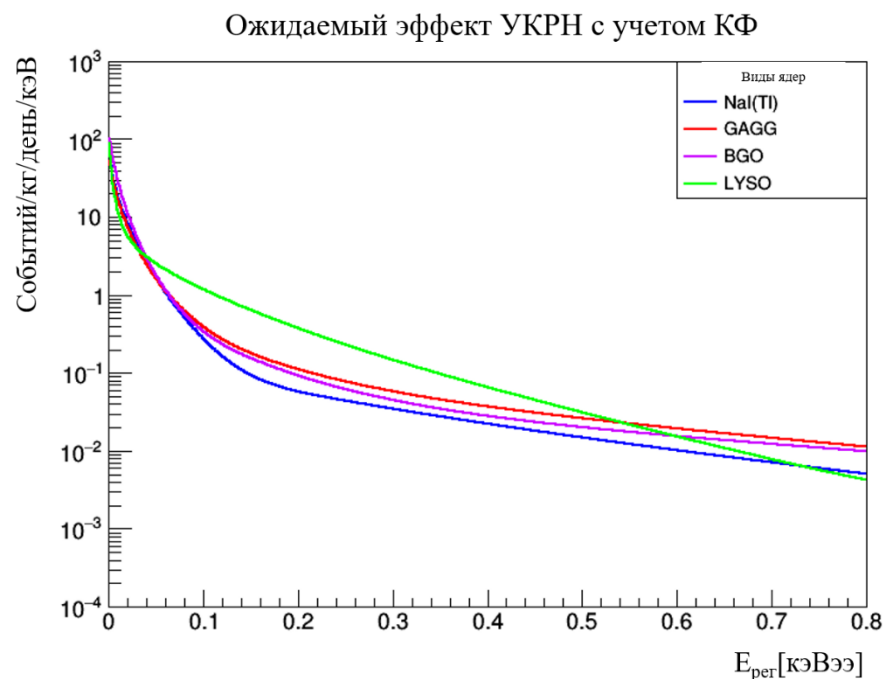
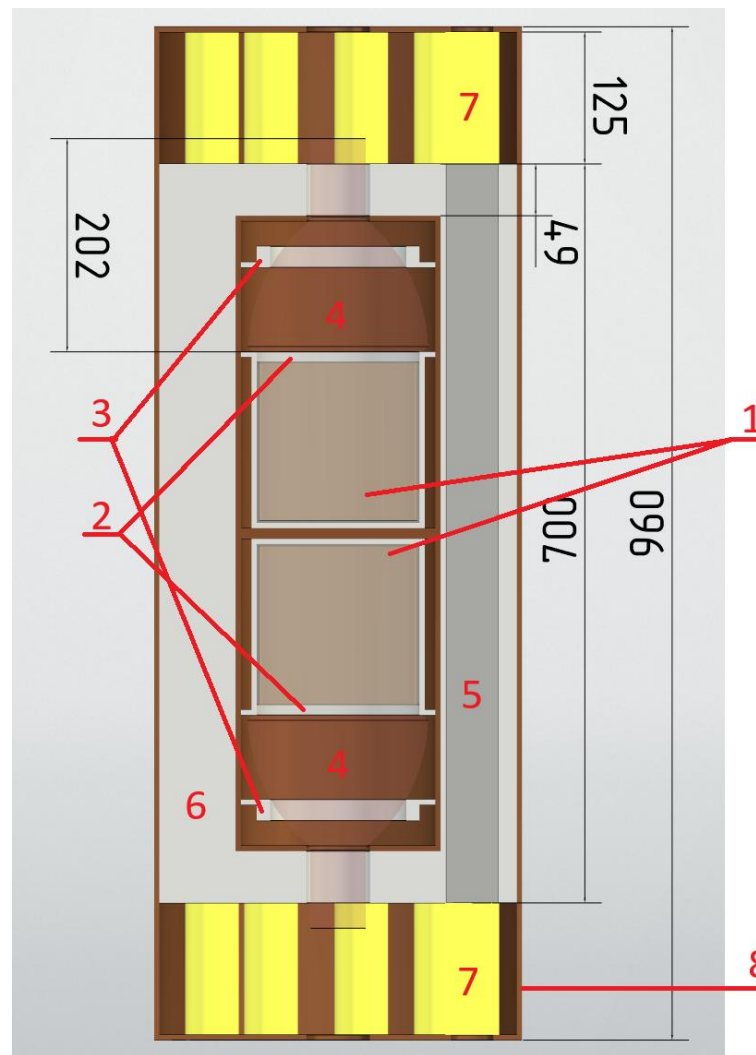
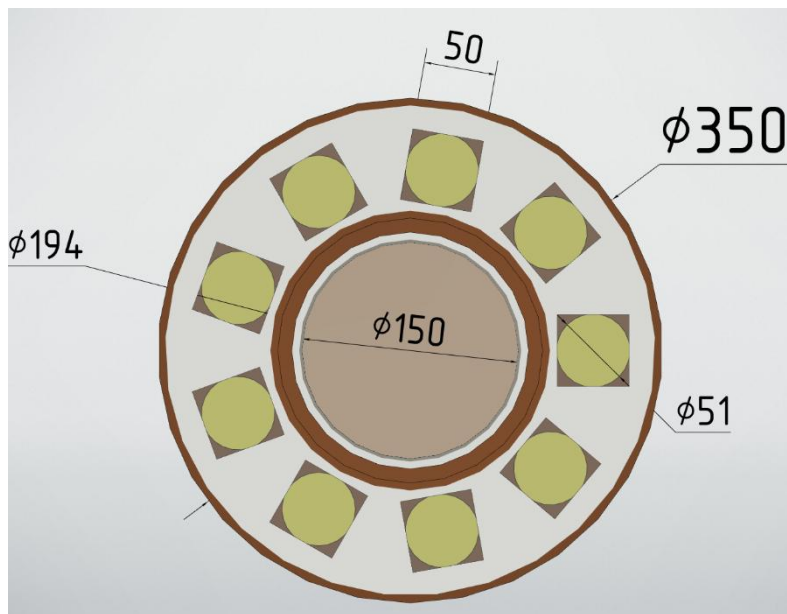


Рис.3 Эффект УКРН для NaI(Tl), GAGG, PbWO<sub>4</sub>, CaWO<sub>4</sub>, с учетом квенч-фактора

# Техническое предложение детектора по поиску УКРН

## Ключевые особенности:

1. Несколько регистрирующих блоков;
2. Многослойная пассивная защита;
3. Наличие анти-комптоновского вето.

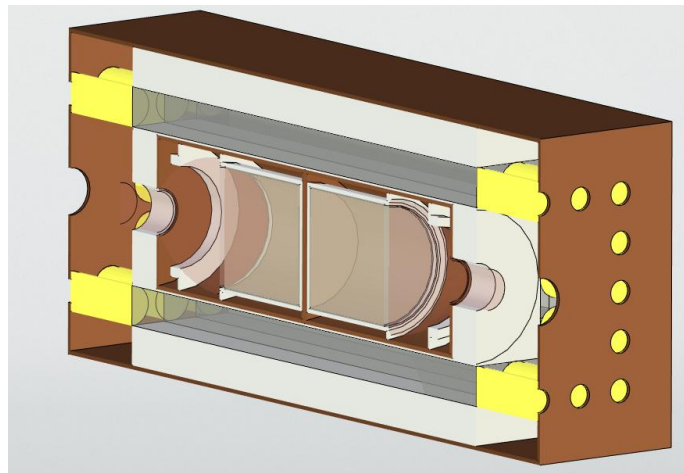


1. NaI(Tl) в герметичном корпусе;
2. Стеклое окно
3. Фиксатор ФЭУ из борированного полиэтилена (ПЭТ)
4. ФЭУ-49;
5. Массив из 9/20 орг. сцинтилляторов на основе полистирола;
6. Борированный ПЭТ;
7. Массив из 9/20 ФЭУ ГОИ N4021-2
8. Внешний корпус из меди.

Рис.4 Детектор, вид в разрезе, сбоку.

Рис.5 Детектор, вид в разрезе, сверху.

# Монте-Карло моделирование отклика детектора



Geant4

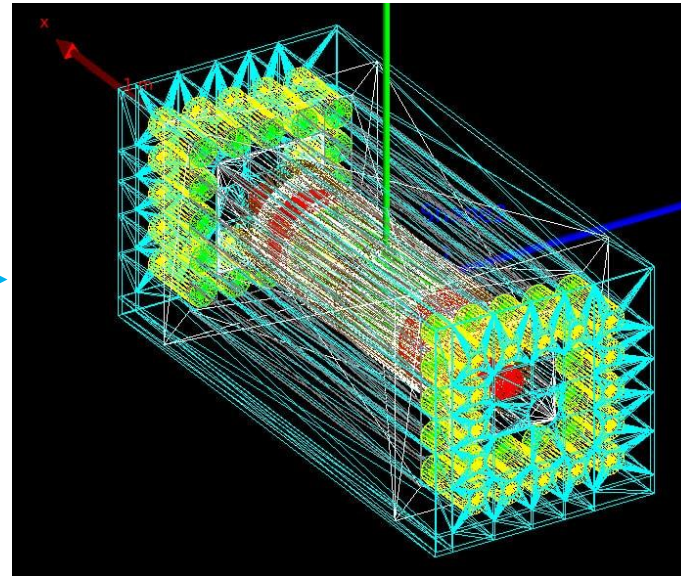


Рис.6 Конфигурация детектора с полным комтон-вето

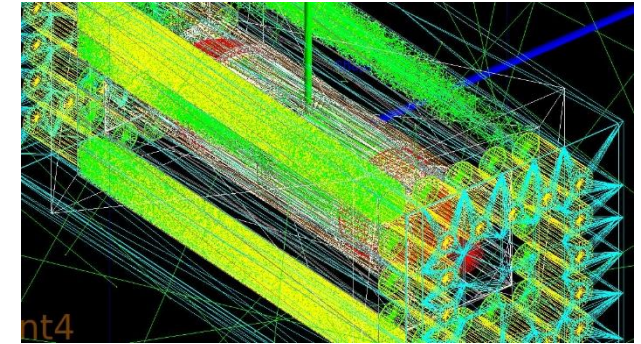


Рис.7 Работа сцинтилляторов

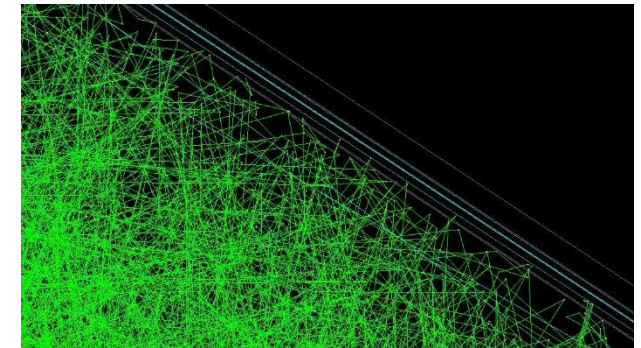
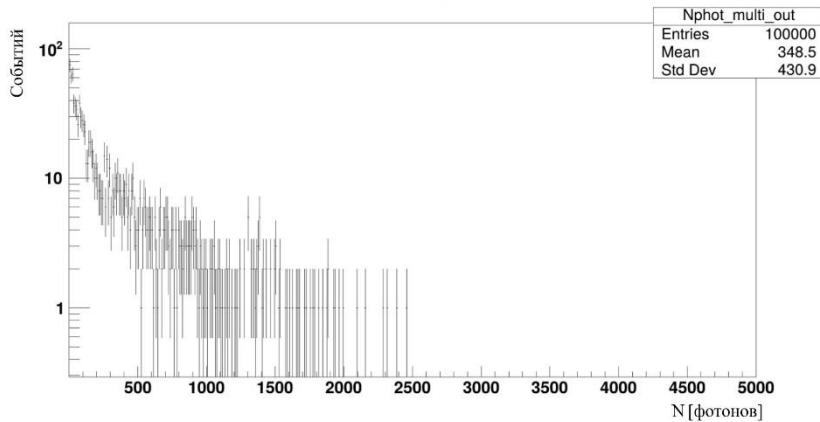


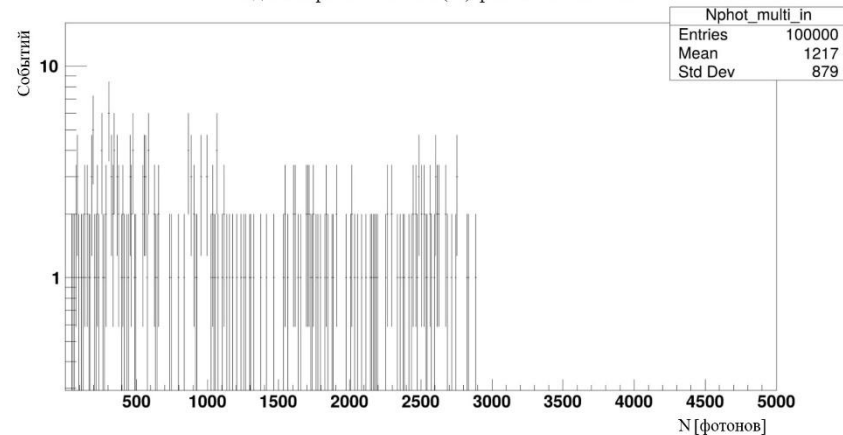
Рис.8 Отражение фотонов

Рис.9 Светосбор в полистироле и NaI для 100 тысяч  $\gamma$  от  $^{40}\text{K}$

Задетектированные в полистироле фотоны за 1 событие



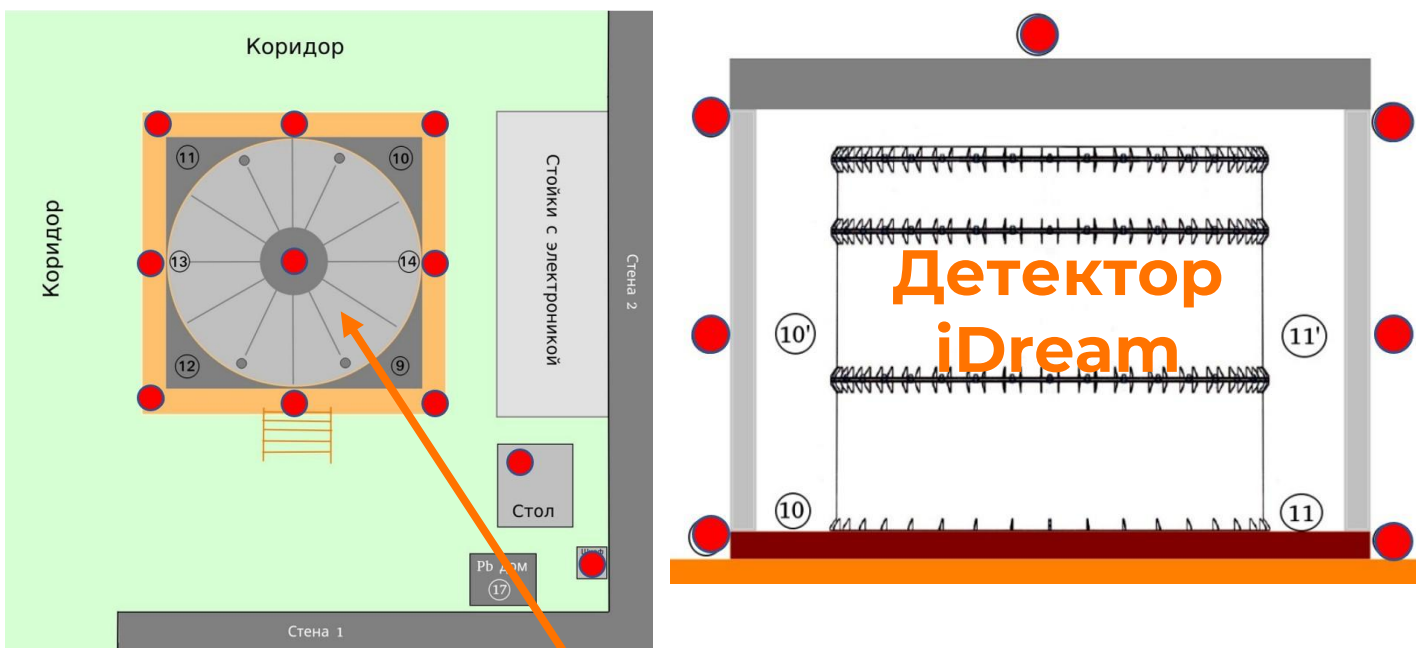
Задетектированные в NaI(Tl) фотоны за 1 событие



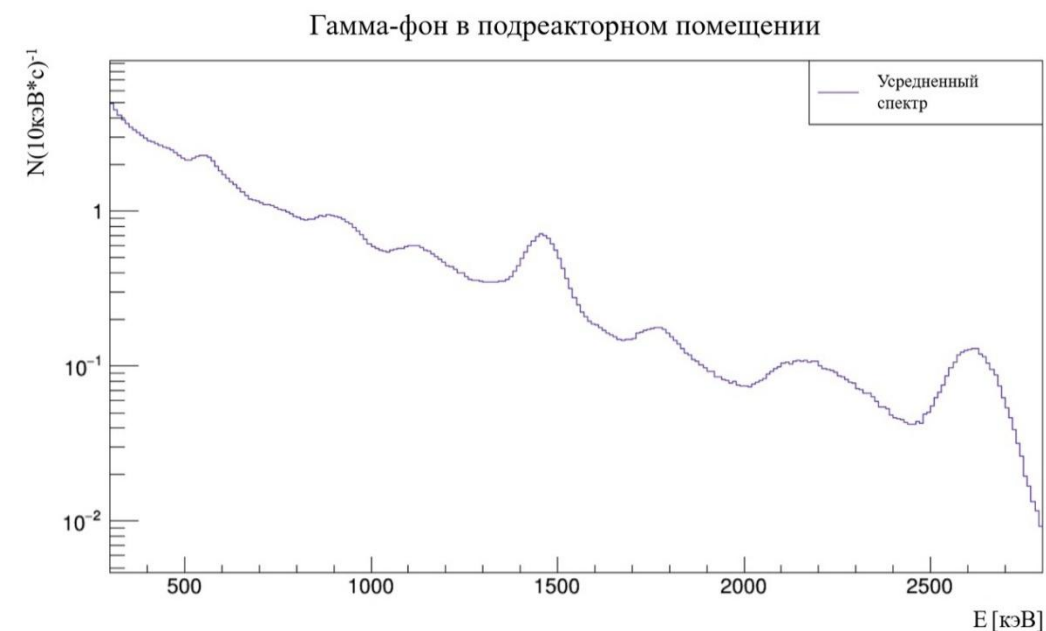
# Поиск модели $\gamma$ -фона в подреакторном помещении энергоблока №3 КАЭС

Рис.10 Точки экспериментальных измерений в помещении 3А-121/1, которые использовались при формировании усредненного спектра (отмечены красным)

Рис.11 Спектр  $\gamma$ -фона набранный в помещении 3А-121/1



**Детектор  
iDream**



# Модель NaI детектора в Geant4 для генерации данных

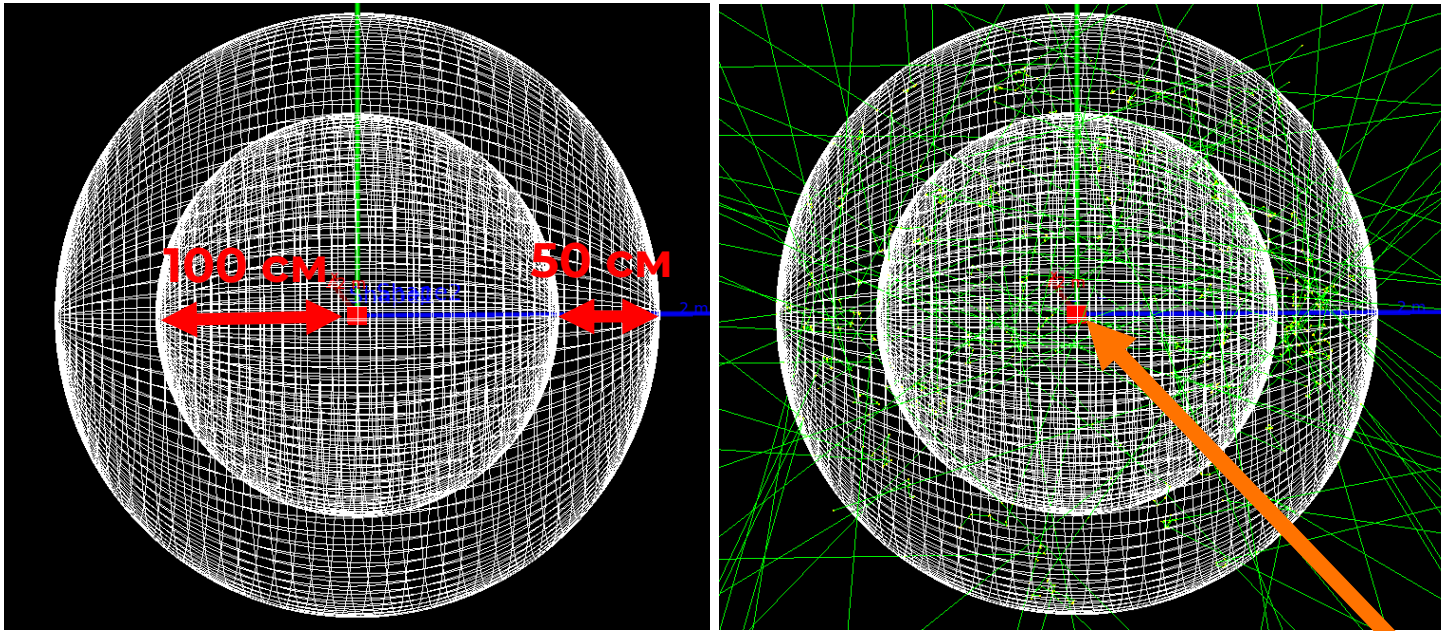


Рис.12 Геометрия модели для генерации данных в Geant4

NaI(Tl)  $\varnothing$  9см x 9см

Рис.13 Пример изотропного «розыгрыша» 100 событий в бетонной сфере

Для изотопов:  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{41}\text{Ar}$  и неравновесных рядов  
 $^{238}\text{U}$ :  $^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U} \rightarrow ^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Pb} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$   
 $^{232}\text{Th}$ :  $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{228}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$

Были сгенерированы 11 наборов данных по 100-1000 млн событий изотропно в бетонной сфере толщиной 50 см.

# Параметры модели

Для решения задачи оптимизации были использованы алгоритм Simplex, ConjugateFR, Scan в составе пакета Root. Модель содержит 16 свободных параметров, из них:

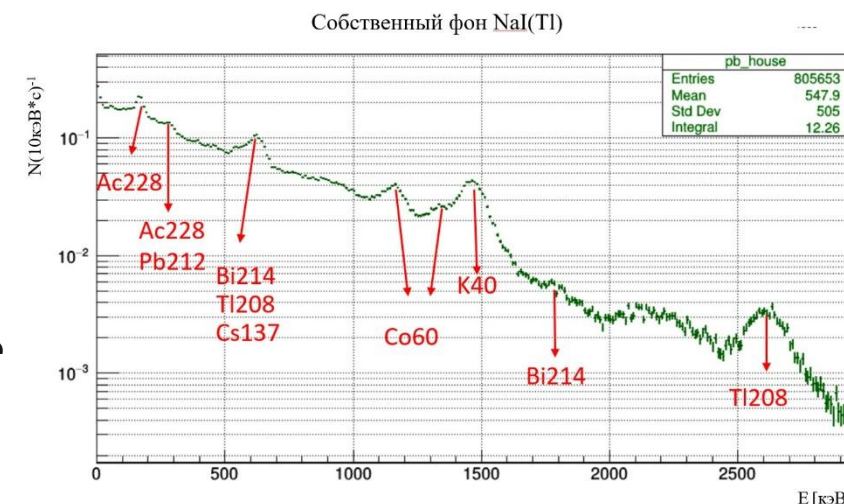
$$\sigma_k = \sqrt{a^2 + b^2 E_k + c^2 E_k^2} \quad \mathbf{3 - параметра энергетического разрешения}$$

$\sigma_k$  - стандартное отклонение выделенной в сцинтилляторе энергии, где **a, b, c** – параметры, **E<sub>k</sub>** – энергия события

$$E_{exp} = d + eE_{vis} \quad \mathbf{2 - параметра функции отклика}$$

**E<sub>exp</sub>** - энергия события, наблюдаемая на эксперименте, где **d, e** – параметры, **E<sub>vis</sub>** – энергия события, с учетом энергетического разрешения

**11 – параметров масштабирования гистограмм отдельных изотопов и радиоактивных рядов**



R(E)

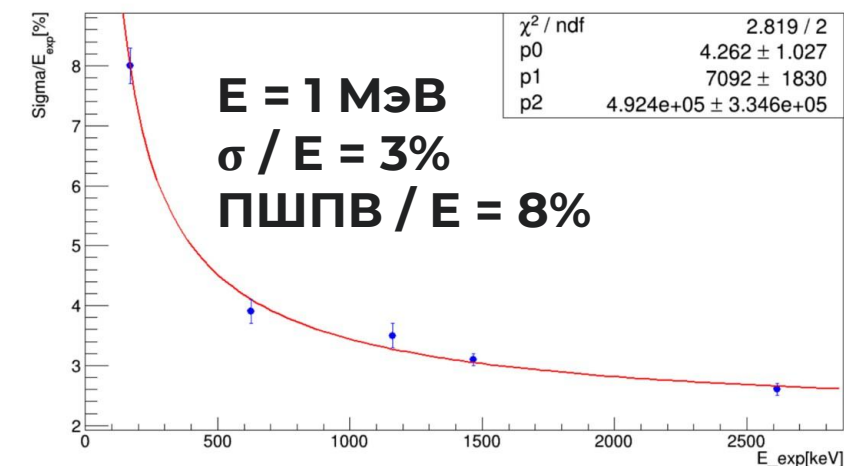
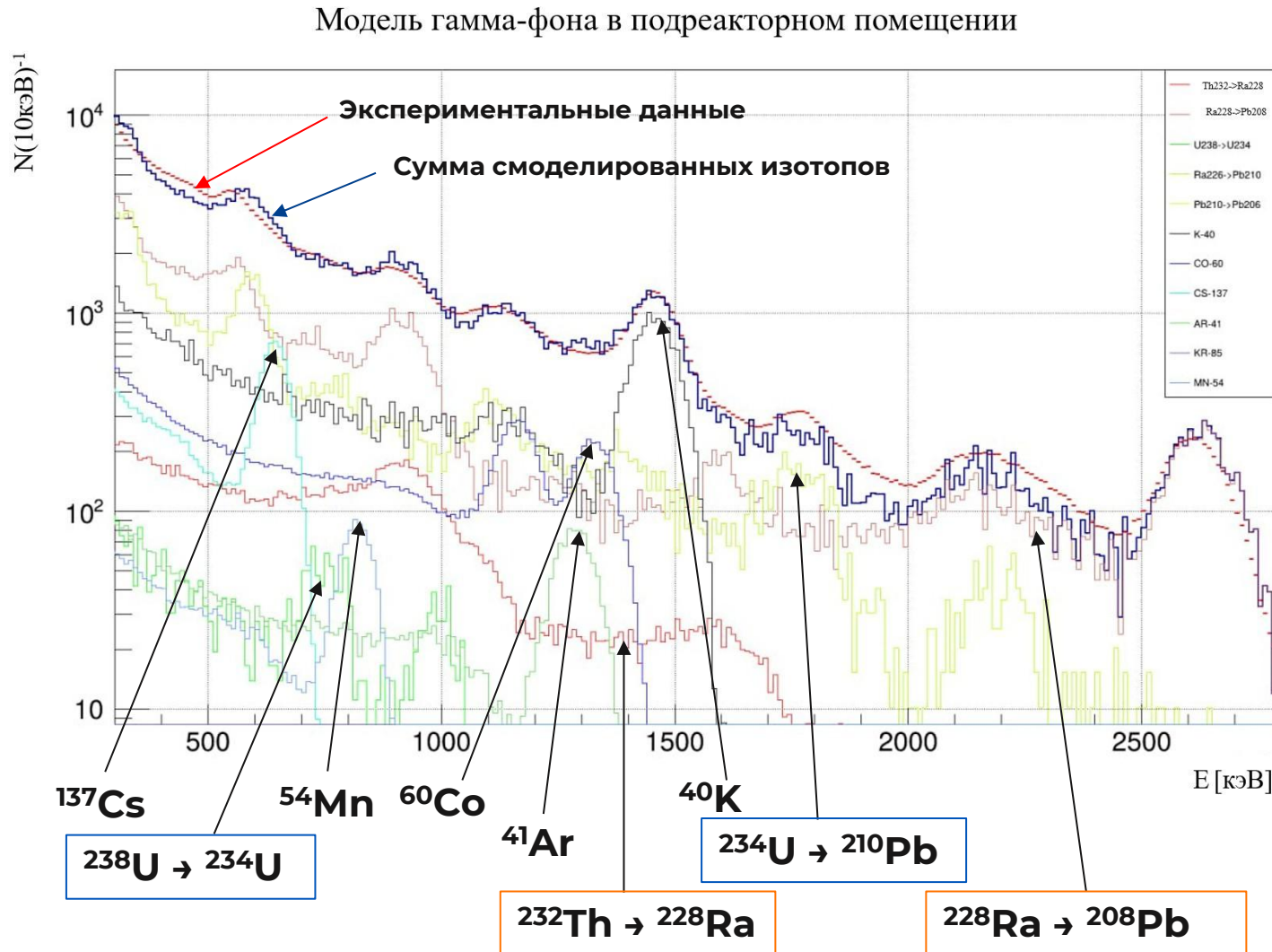


Рис.14 Вывод параметров энергетического разрешения из измерений собственного фона NaI

# Согласие модели с экспериментальными данными

Рис.15 Сравнение экспериментального спектра с модельным



Согласование модели с экспериментом в разных диапазонах энергий

**0.3-2.8 МэВ**

$$\chi^2/\text{ndf} = 1067.53 / 251 \approx 4.3$$

**2.0-2.8 МэВ**

$$\chi^2/\text{ndf} = 161.105 / 81 \approx 2.0$$

**1.0-2.0 МэВ**

$$\chi^2/\text{ndf} = 300.544 / 101 \approx 3.0$$

**0.3-1.0 МэВ**

$$\chi^2/\text{ndf} = 695.986 / 71 \approx 9.8$$

# Активности изотопов-загрязнителей

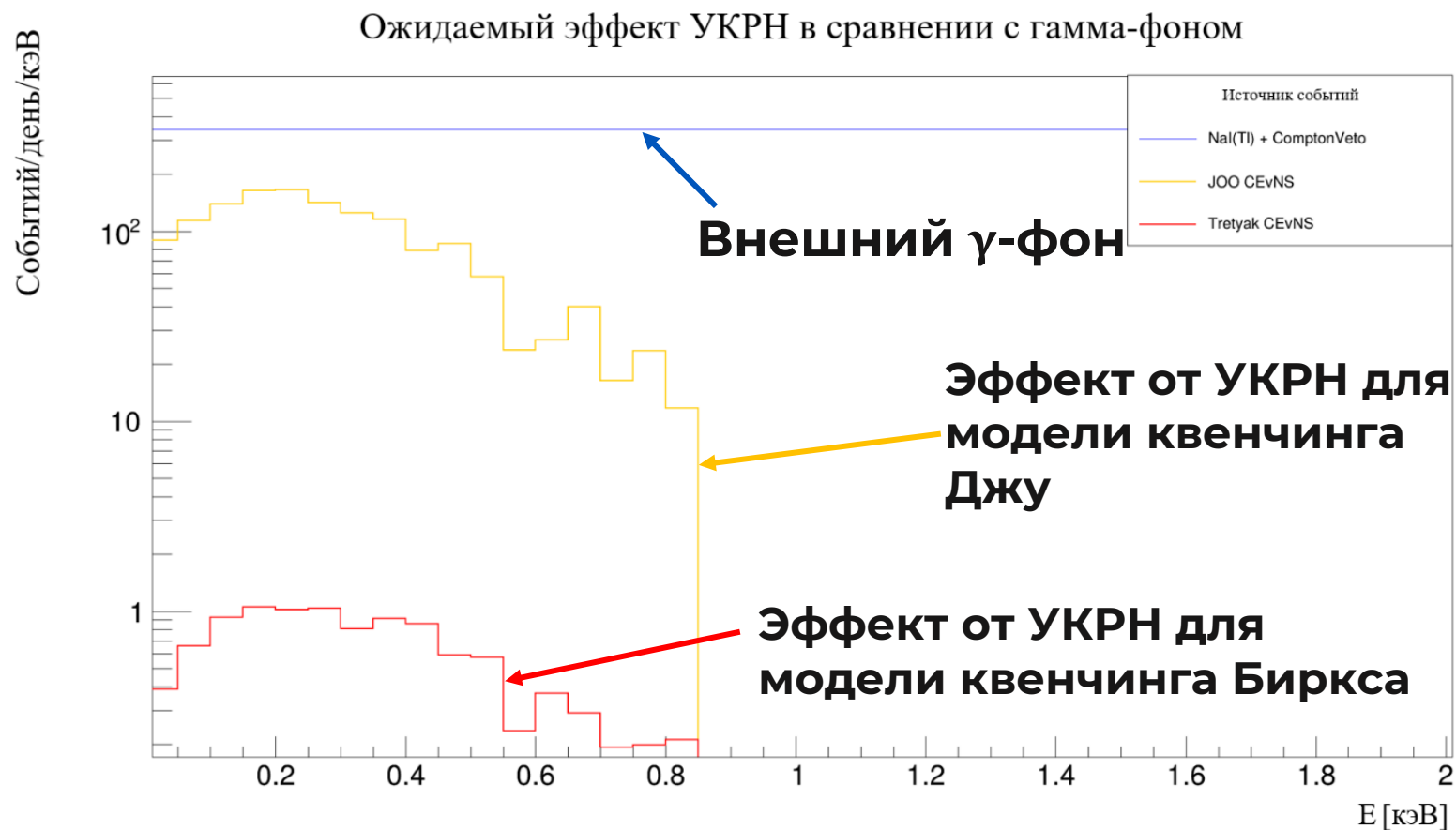
ИЗОТОП	$A_{\text{МОД}}$ , Бк/кг*	$A_{\text{СТ}}$ , Бк/кг*
$M_{Cs}$	$4.1 \pm 0.3$	$< 1$
$M_{Co}$	$2.17 \pm 0.13$	-
$M_K$	$95 \pm 2$	$240 \pm 108$
$M_{U^{238}}$	$19.5 \pm 0.3$	24.5
$M_{Ra^{226}}$	$11.37 \pm 0.07$	$44 \pm 21$
$M_{Th^{232}}$	$2.0 \pm 0.2$	$30 \pm 14$
$M_{Ra^{228}}$	$13.36 \pm 0.13$	-
$M_{Ar^{41}}$	$(1.79 \pm 0.11) \times 10^3$	$5.1 \times 10^3$
$M_{Kr^{85}}$	$(3.0 \pm 0.11) \times 10^3$	1.5
$M_{Mn^{54}}$	$0.54 \pm 0.04$	$0.7 \pm 0.3$

Таблица 1 - Удельные активности изотопов в фоне подреакторного помещения. \* для Ar41 и Kr85 активности указаны в Бк/м<sup>3</sup>.  $A_{\text{СТ}}$ , Бк/кг - удельная активность изотопов в бетоне для жилищного строительства или на территориях вблизи АЭС(для Kr85, Ar41, Mn54)

# Ожидаемый сигнал УКРН для предлагаемого детектора

Для спектров реакторных антинейтрино, рассчитанных по модели суммирования Perissé[1], был проведен аналитический расчет ожидаемого эффекта от УКРН при разных моделях квенчинга (Джу и Биркса). На рисунке 12 представлено сравнение ожидаемого эффекта УКРН с сигналом от внешнего  $\gamma$ -фона, смоделированного методом Монте-Карло в предлагаемой установке без пассивной защиты.

Рис.16 Ожидаемый эффект УКРН в сравнении с  $\gamma$ -фоном



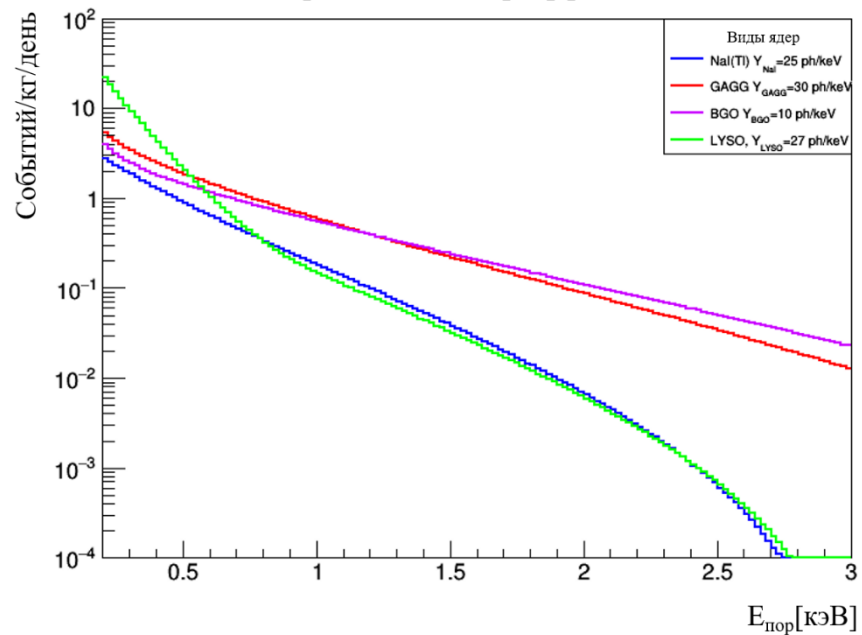
[1] Perissé L. – 2021. – URL: <https://theses.hal.science/tel-03538198>

## В рамках проведенного исследования получены следующие основные результаты:

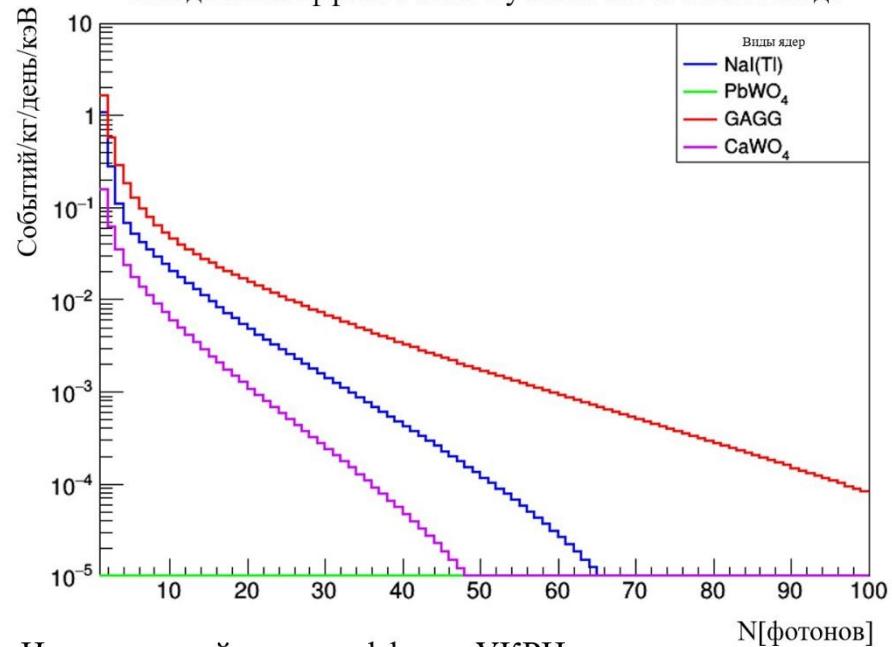
- Проведен расчет ожидаемого эффекта от УКРН реакторных антинейтрино в мишенях на основе NaI,  $\text{PbWO}_4$ ,  $\text{CaWO}_4$ , BGO, GAGG, LYSO.
- Разработано техническое предложение установки для измерения эффекта УКРН от реакторных электронных антинейтрино на основе кристаллов NaI(Tl) и детекторов на основе пластиковых сцинтилляторов в качестве анти-комптоновского вето; проведено Монте-Карло моделирование предложенного детектора в GEANT4.
- Проведено изучение  $\gamma$ -фона в подреакторном помещении энергоблока №3 Калининской АЭС. Разработана Монте-Карло модель NaI-детектора для изучения  $\gamma$ -фона и найдена модель  $\gamma$ -фона в помещении.
- Рассчитаны удельные активности изотопов – источников  $\gamma$ -фона. Показано, что наибольшую активность в помещении на уровне  $(95 \pm 2)$  Бк/кг дает  $^{40}\text{K}$ , а также появляется характерный для атомных станций  $^{137}\text{Cs}$  с активностью  $(4.1 \pm 0.3)$  Бк/кг.
- В зависимости от модели квенчинга, ожидаемый сигнал от УКРН в 2-200 раз меньше сигнала от внешнего  $\gamma$ -фона в помещении (для детектора без пассивной защиты). При добавлении защиты возможно выйти на чувствительность к УКРН.

# Дополнительный слайд №1

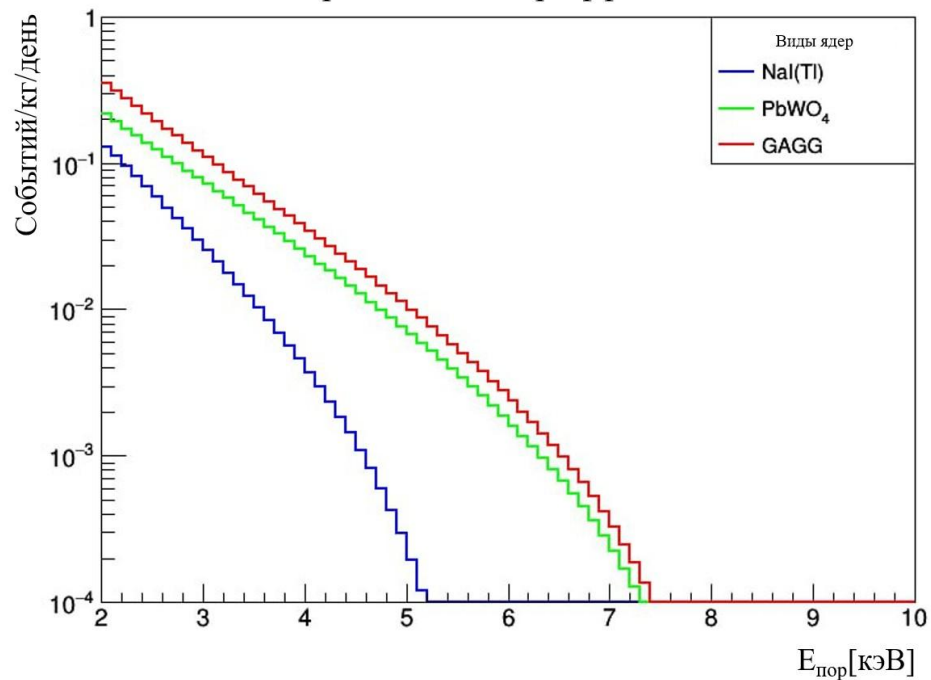
Интегральный спектр эффекта УКРН



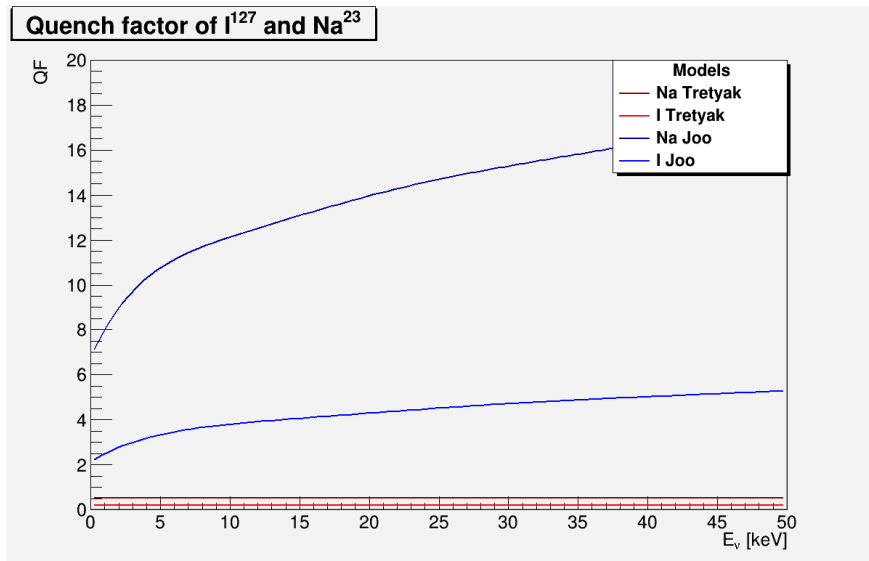
Ожидаемый эффект УКРН с учетом КФ и световыхода



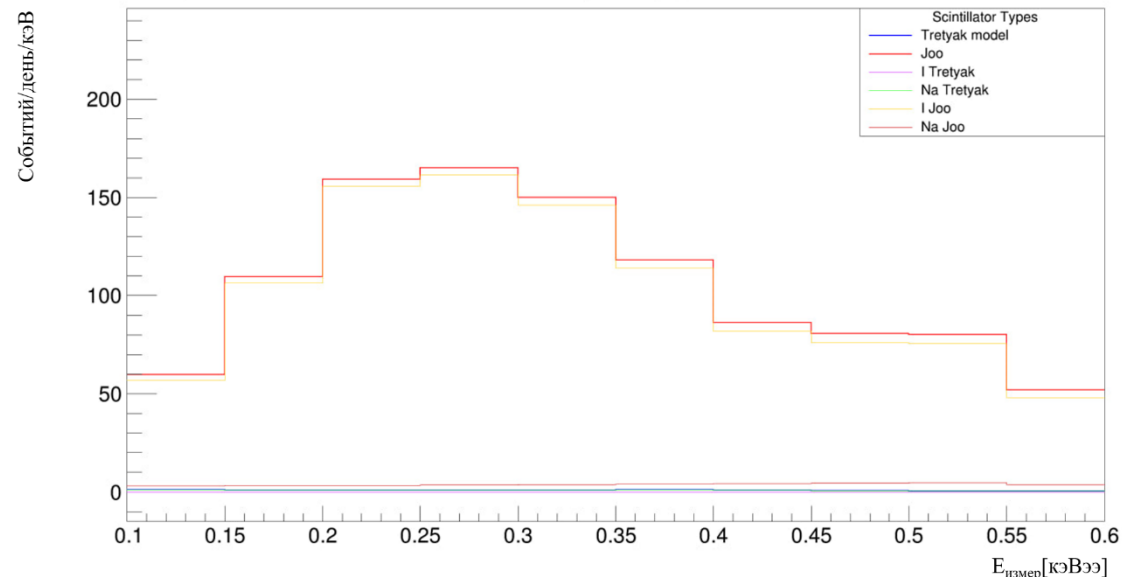
Интегральный спектр эффекта УКРН



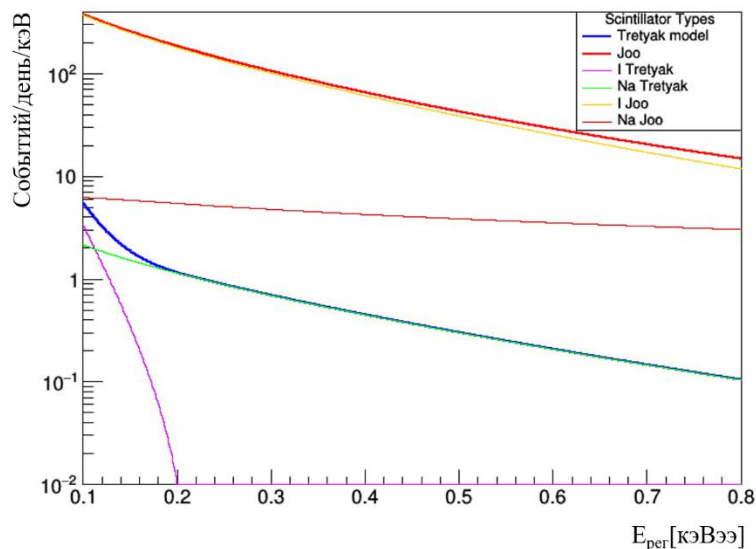
# Дополнительный слайд №2



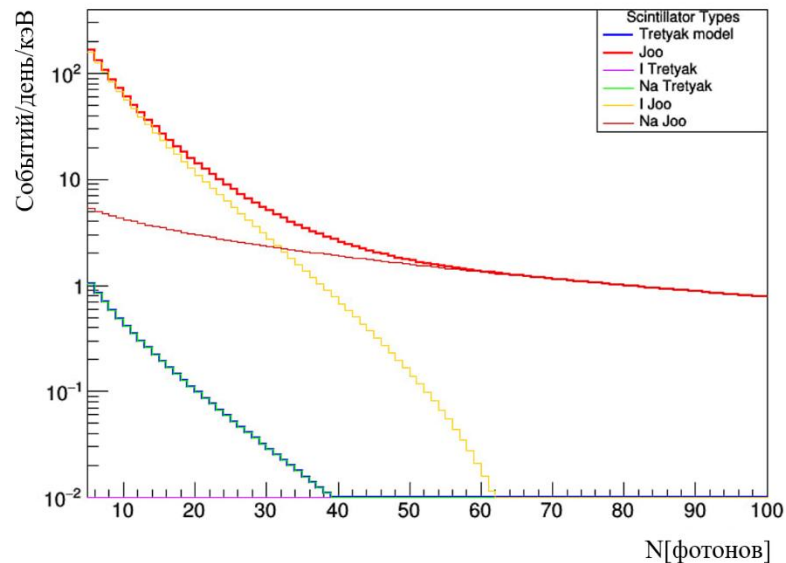
Ожидаемый эффект УКРН для 20 кг NaI(Tl) с учетом электроники



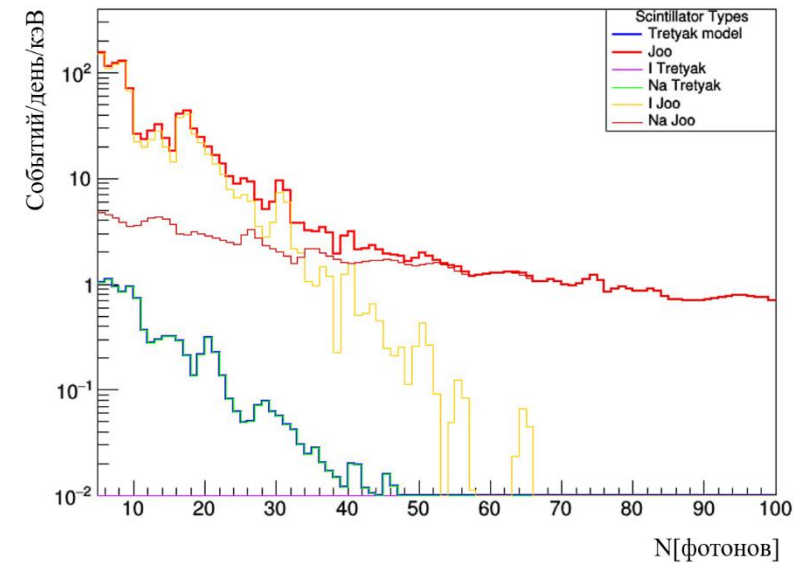
Ожидаемый эффект УКРН для 20 кг NaI(Tl)



Ожидаемый эффект УКРН для 20 кг NaI(Tl)

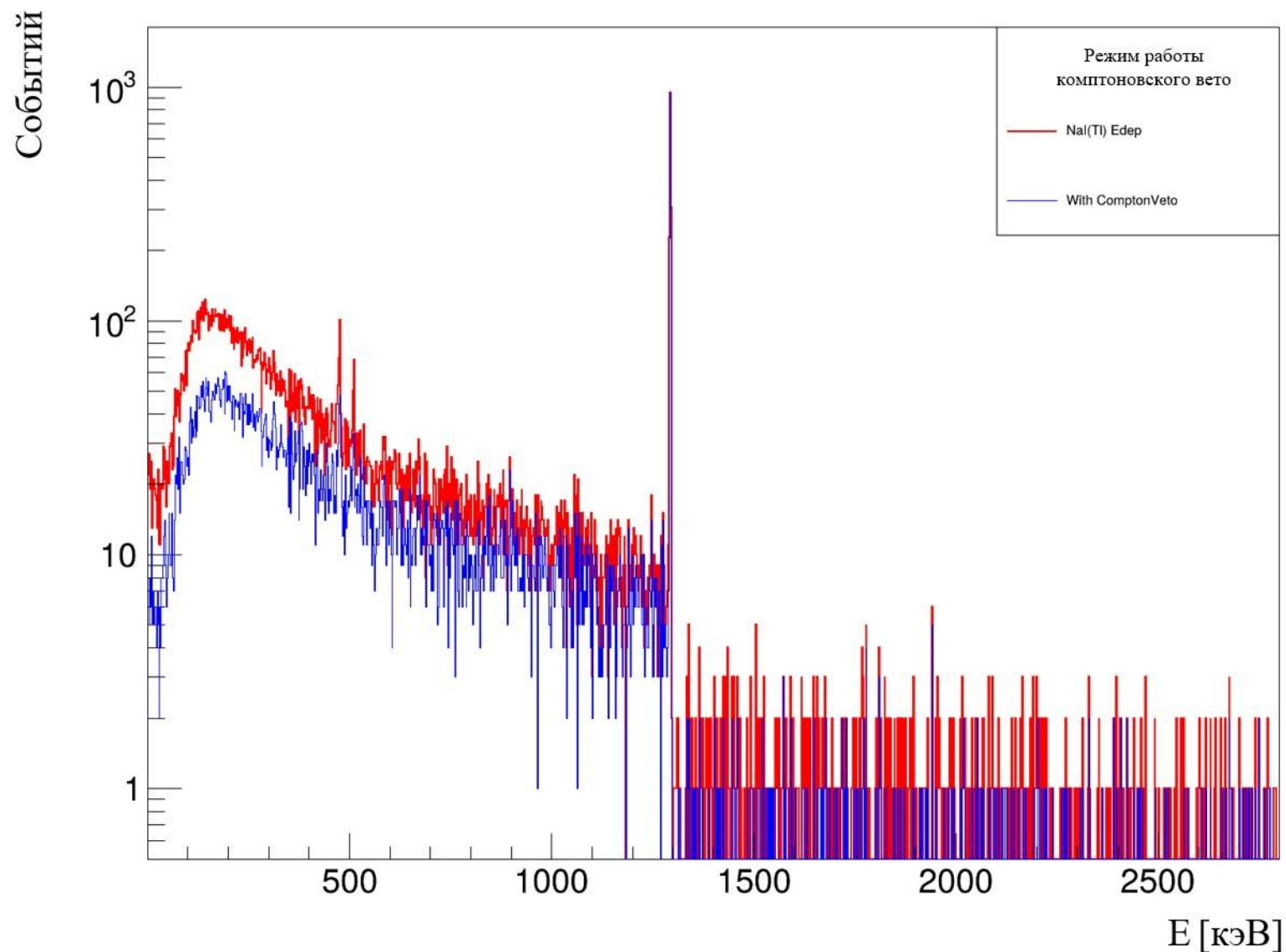


Ожидаемый эффект УКРН для 20 кг NaI(Tl)

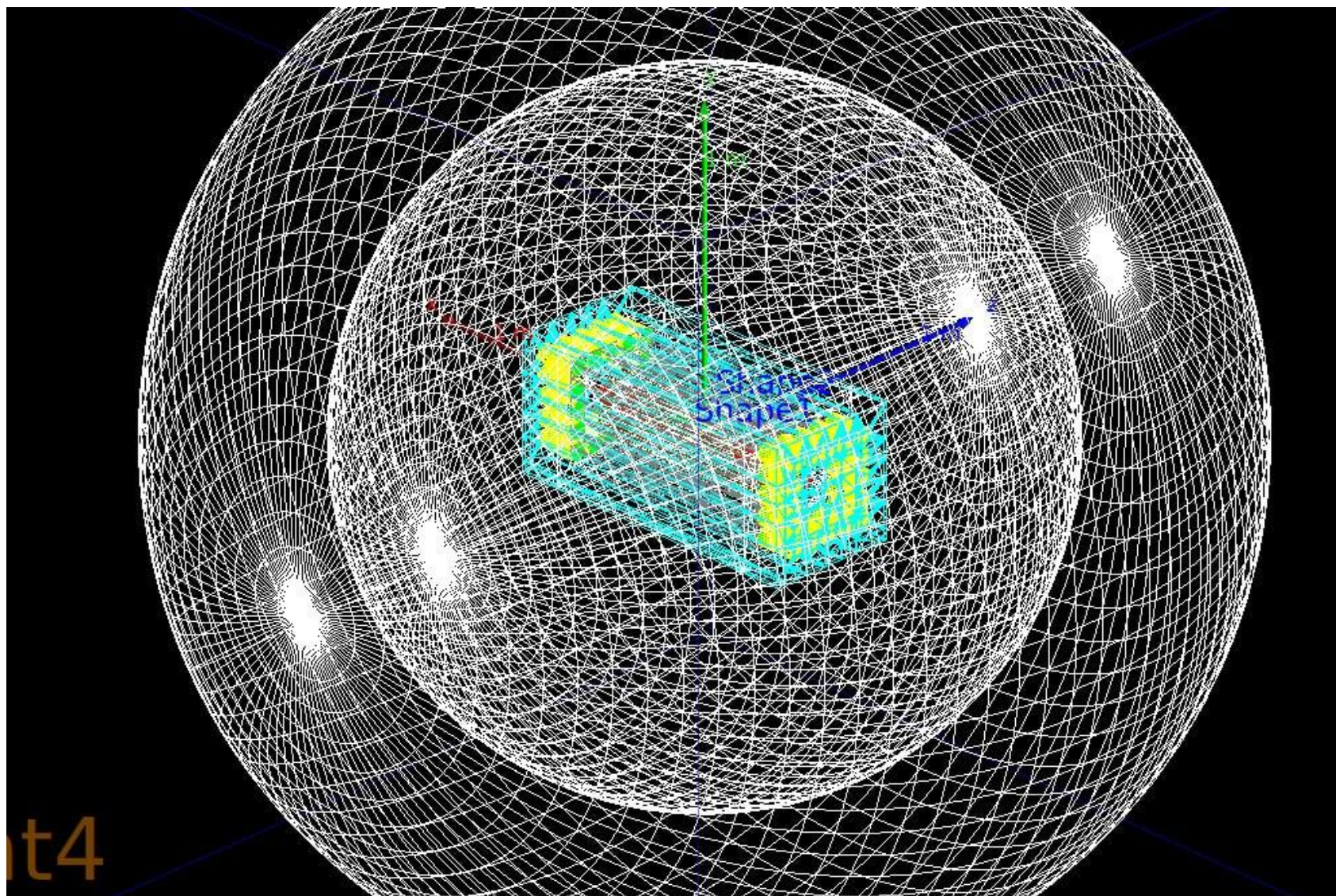


# Дополнительный слайд №3

Энерговыведение в NaI(Tl) с вето и без



# Дополнительный слайд №4





## Дополнительный слайд №6

Параметр	$a^2$ , МэВ <sup>2</sup>	$b^2$ , МэВ	$c^2$ , 1
$\sigma$	$(4.3637 \pm 0.0001) \times 10$	$(9.930 \pm 0.009) \times 10^{-1}$	$(3.71 \pm 0.01) \times 10^{-4}$

Таблица 4.2 - Параметры энергетического разрешения детектора

Параметр	Значение	Число МК событий
$M_{Cs^{137}}$	$0.185 \pm 0.011$	$10^9$
$M_{Co^{60}}$	$0.097 \pm 0.006$	$10^9$
$M_{K^{40}}$	$4.24 \pm 0.09$	$10^9$
$M_{U^{238} \rightarrow U^{234}}$	$2.77 \pm 0.06$	$10^8$
$M_{U^{234} \rightarrow Pb^{210}}$	$5.09 \pm 0.03$	$10^8$
$M_{Pb^{210} \rightarrow Pb^{206}}$	$1.49 \pm 0.03$	$4 \times 10^8$
$M_{Th^{232} \rightarrow Ra^{228}}$	$0.25 \pm 0.01$	$10^8$
$M_{Ra^{228} \rightarrow Pb^{208}}$	$2.99 \pm 0.03$	$2 \times 10^8$
$M_{Kr^{85}}$	$0.27 \pm 0.01$	$2 \times 10^8$
$M_{Ar^{41}}$	$0.16 \pm 0.01$	$2 \times 10^8$
$M_{Mn^{54}}$	$0.12 \pm 0.01$	$2 \times 10^8$

Параметр	$K_{\text{конст}}$ , кэВ	$K_{\text{лин}}$ , 1
Отклик E	$-24.09 \pm 0.01$	$1.0135 \pm 0.0001$

Таблица 4.3 - Параметры функции отклика

Таблица 4.4 - Значения параметров масштабирования гистограмм изотопов и число сгенерированных Монте-Карло(МК) событий для каждого из ИЗОТОПОВ

# Дополнительный слайд №7

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_{\text{бин}}} \frac{(N_{\text{мод}}(i) - N_{\text{эксп}}(i))^2}{\sigma_{\text{мод}}^2(i) + \sigma_{\text{эксп}}^2(i)}$$

$N_{\text{мод}}$  - число событий в бине для модели,

$N_{\text{эксп}}$  - число событий в бине для эксперимента,

$i$  - номер бина гистограммы(Энергия, МэВ) ,

$\sigma_{\text{мод}}$  - стандартное отклонение числа смоделированных событий,

$\sigma_{\text{эксп}}$  - стандартное отклонение числа смоделированных событий,

$N_{\text{бин}}$  - число бинов в которых проверяется гипотеза  
(0,3 МэВ – 2,8 МэВ)

*Согласование модели с экспериментом в разных  
диапазонах энергий*

**0.3-2.8 МэВ**

**$\chi^2/\text{ndf} = 1067.53 / 251 \approx 4.3$**

**2.0-2.8 МэВ**

**$\chi^2/\text{ndf} = 161.105 / 81 \approx 2.0$**

**1.0-2.0 МэВ**

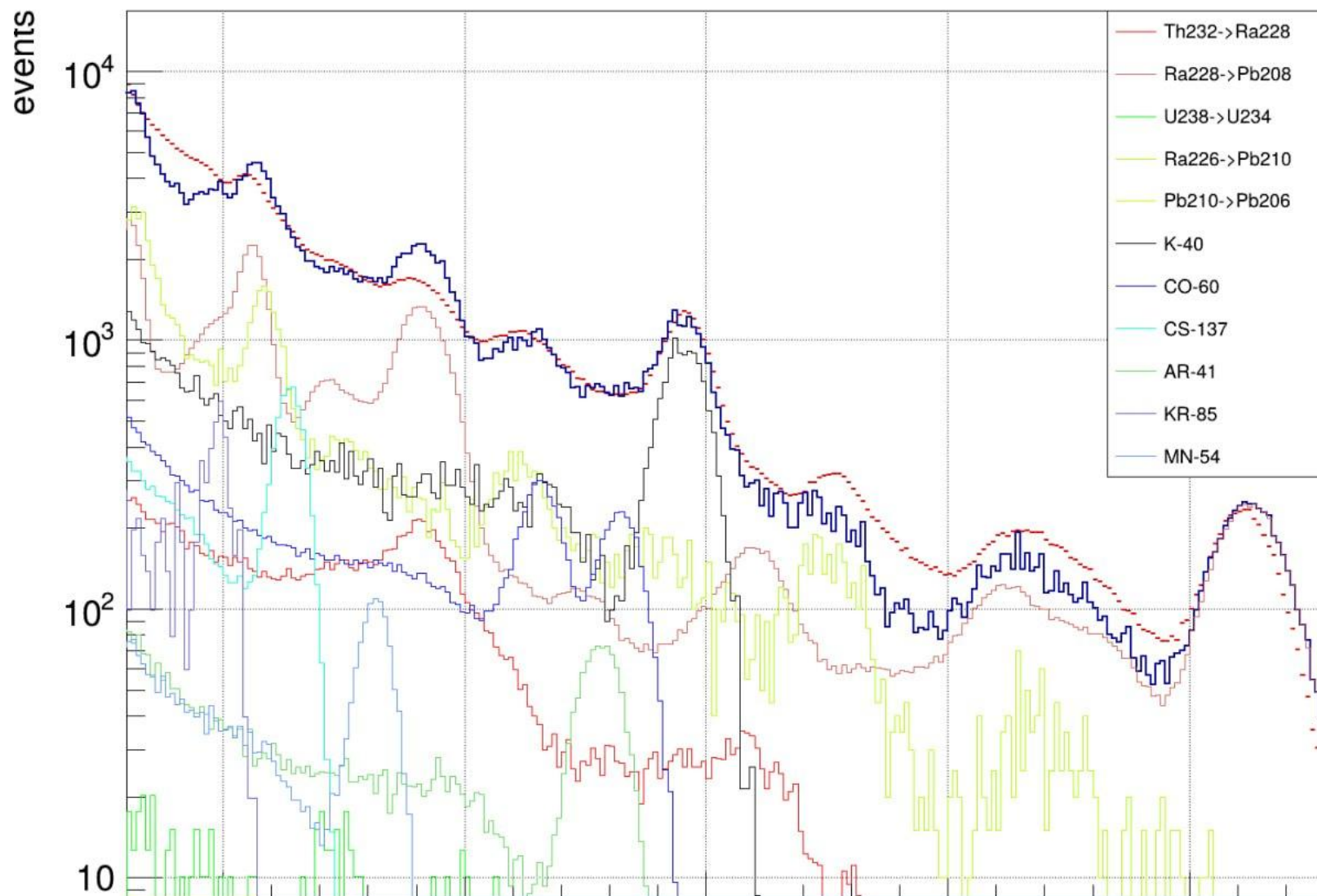
**$\chi^2/\text{ndf} = 300.544 / 101 \approx 3.0$**

**0.3-1.0 МэВ**

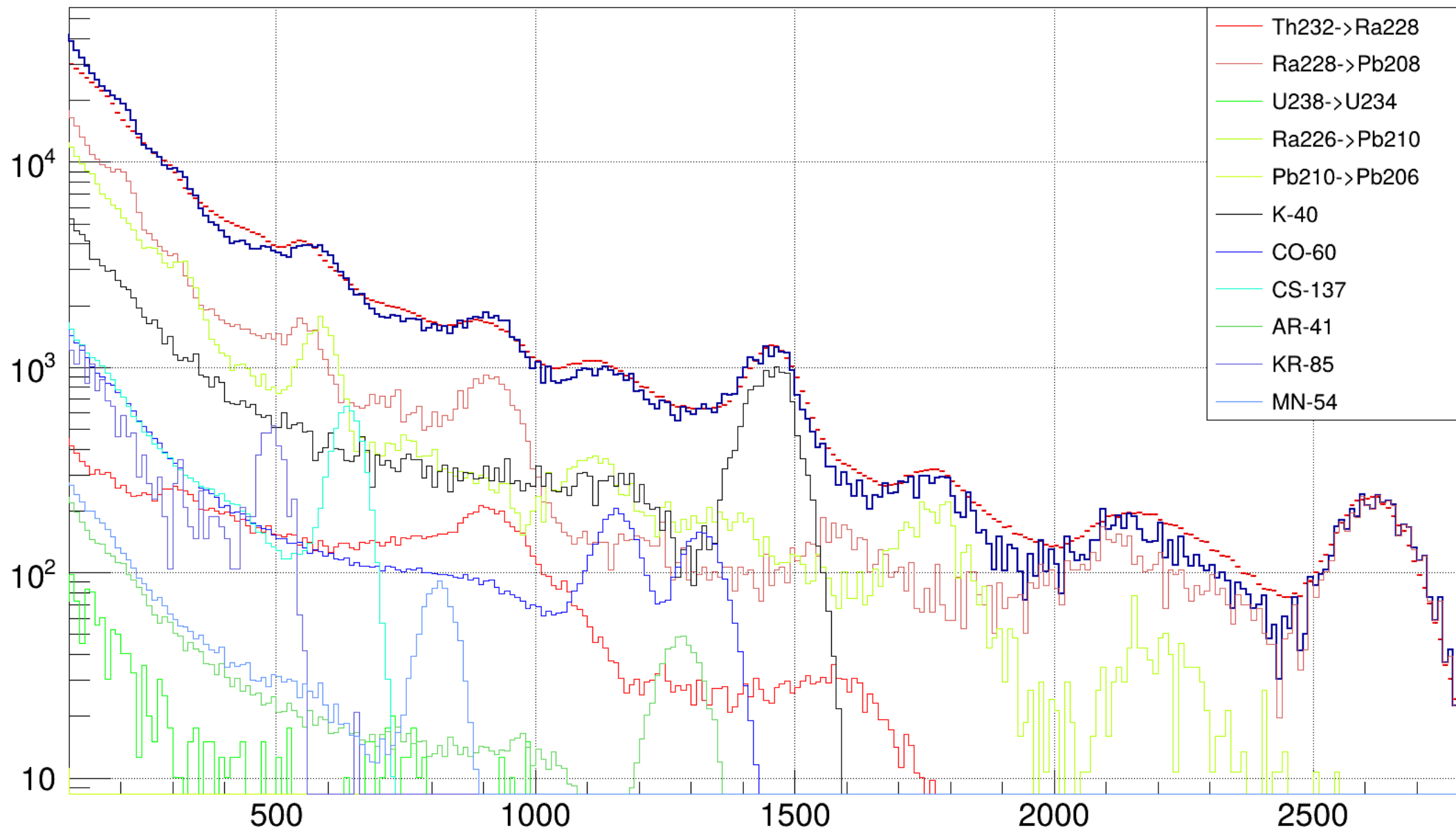
**$\chi^2/\text{ndf} = 695.986 / 71 \approx 9.8$**

# Дополнительный слайд №8

diff-bckg



# Дополнительный слайд №9

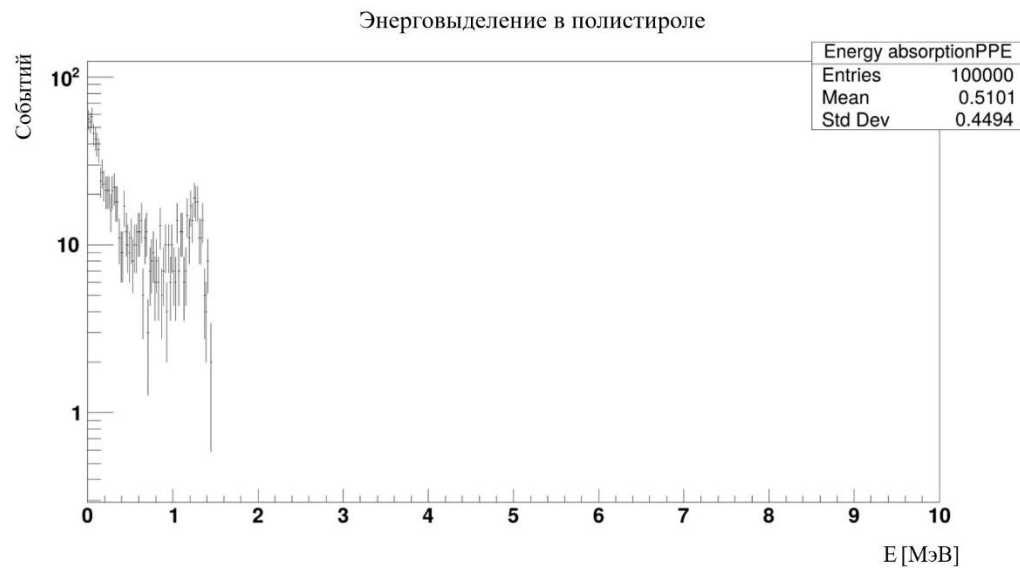


# Дополнительный слайд №10

SAMPLE	Mass [g]	Specific activity [Bq/kg] (68 C.L.)					Check Up	
		K-40	Co-60	Cs-137	Th-232	U-238		
China PMT N2014 PPE2404- 1044 small	19	77 ± 24	< 1.5	< 2.8		6.2 ± 2.7	< 4.4	+
China NaI(Tl) h=160 mm d=30 mm	340	< 12	< 0.3	< 0.6		< 0.8	< 1.4	+
Glass Of China NaI(Tl) d=30 mm	4.2	161 ± 11  (весь К-40 в стекле)	< 0.35	< 0.2		1.1 ± 0.5	1.9 ± 0.7	+

# Дополнительный слайд №11

## Рис.10 Энерговыведение в полистироле



## Рис.11 Энерговыведение в NaI от 100000 $\gamma$ $^{40}\text{K}$

