

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

УДК 539.123.6

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
МОДЕЛЬ γ -ФОНА В ПОДРЕАКТОРНОМ
ПОМЕЩЕНИИ ЭНЕРГОБЛОКА №3 КАЭС

Научный руководитель

(доц., к.ф.-м.н.)

_____ Е. А. Литвинович

Консультант

(к.ф.-м.н.)

_____ И. Н. Мачулин

Студент

_____ В. М. Крапля

Москва, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Модели γ-фонов в помещениях на АЭС	6
2 Создание модели γ-фона	9
2.1 Анализ экспериментальных данных	9
2.2 Моделирование отклика детектора в Geant4	10
2.3 Поиск модели γ -фона в помещении на основе данных модели- рования	15
3 Заключение	18
Список использованных источников	19

ВВЕДЕНИЕ

Эффект упругого когерентного рассеяния нейтрино (УКРН) - это процесс рассеяния нейтрино с энергиями ниже 30 МэВ на ядрах атомов посредством виртуального Z-бозона. Данный эффект был предсказан в рамках Стандартной Модели (СМ) Фридманом [1] в 1973 году после открытия явления нейтрального тока для слабого взаимодействия. УКРН было зафиксировано от импульсного источника, в виде коллайдера SNS (Spallation Neutron Source) [2], на 3 разных типах детекторов, на основе неорганического сцинтиллятора CsI[Na], HPGe и LAr, в рамках коллаборации COHERENT [3], от ядерного реактора коллаборацией CONUS+ [4] детектором на основе HPGe и от солнечных нейтрино коллаборацией PandaX [5], с детектором на основе жидкого ксенона.

Главной отличительной чертой УКРН является его сечение взаимодействия(1), которое зависит от квадрата числа нейтронов в ядре. Это объясняется тем, что длина волны нейтрино с малым импульсом по размерам сопоставима с размерами ядра атома из-за чего нейтрино рассеивается одновременно на всех его нуклонах, что для тяжелых ядер мишени дает выигрыш в сечении взаимодействия по сравнению с сечением обратного бета-распада (ОБР) в десятки-сотни раз. [6]

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

Актуальность исследования УКРН заключается в том, что при проведении измерений данного эффекта можно как уточнять параметры СМ, такие как угол электрослабого смешивания, магнитный момент нейтрино, распределение плотности нейтронов при когерентных процессах, разницу между радиусом нейтрона и протона [7–10], так и искать физику за рамками СМ, например нестандартные взаимодействия нейтрино, аномальный магнитный момент нейтрино или стерильные нейтрино, потому что все вышеперечисленные параметры и взаимодействия влияют на количество регистрируемых

полезных событий [11–14]. Однако помимо актуальности для теоретических исследований, имеет место и актуальность для прикладных исследований в рамках нейтринного мониторинга ядерных реакторов. Отличительной чертой детекторов, использующих УКРН, как метода регистрации нейтрино, будет кратно меньшая масса мишени, чем для детекторов, использующих ОБР, что сделает их более удобными в промышленном применении [6, 15].

Выделение сигнала УКРН в массиве измеренной информации требует наличия крайне точных моделей фоновых условий. Требуется наличие моделей фонов, как внутри самого детектора, так и снаружи, в помещении где он располагается. В рамках работы прошлого семестра была предложена конструкция перспективного детектора на основе неорганических сцинтилляторов. Для точного моделирования отклика данного детектора, в рамках предпроектной проработки эксперимента по поиску УКРН, необходимо провести изучение фоновых условий вблизи реактора.

В данной работе представлена модель γ -фона в помещении 3А-121/1 на 3 энергоблоке Калининской АЭС (КАЭС). Модель была создана в рамках решения задачи оптимизации, с использованием моделирования методом Монте-Карло и алгоритмов безусловной минимизации. Предлагаемая предоставляет информацию о количестве основных радиоактивных загрязнителей, которые являются источниками γ -фона.

Цель: Расчет эффекта от УКРН в перспективном детекторе на основе неорганических сцинтилляторов.

Задачи этого семестра:

1. Анализ экспериментальных данных твердотельного детектора на основе NaI по γ -фону в подреакторном помещении энергоблока 3 Калининской АЭС.
2. Моделирование отклика детектора на основе NaI(Tl) в Geant4
3. Поиск модели γ -фона в помещении на основе данных моделирования.

Актуальность: Исследование фоновых условий является определяющим

фактором успеха при поиске упругого когерентного рассеяния реакторных антинейтрино на ядрах. Поэтому создание модели фона в помещении, позволит провести моделирование отклика перспективного детектора, в рамках технического предложения по установке для поиска УКР реакторных антинейтрино на ядрах.

1. МОДЕЛИ γ -ФОНОВ В ПОМЕЩЕНИЯХ НА АЭС

Для точного моделирования сигнала отклика в детекторе требуется учесть фоновые условия помещения, где стоит детектор, и фоновые условия самого детектора. Подобная модель может быть использована для анализа экспериментальных данных с установки при поиске полезных событий. Рассмотрев измерения γ -фонов в помещениях, где стоят детекторы РЭД-100 и PROSPECT (Рис. 1,2) [16–18], а также, изучив энергетический спектр фона в специализированной нейтринной лаборатории под Ровенской АЭС (Рис. 3), можно сделать ряд наблюдений. Во-первых, это наличие отчетливо видимых пиков полного поглощения от Cs-137, K-40, Bi-214 и Tl-208, которые относятся к радиоактивным рядам U-238 и Th-232 соответственно. Во-вторых, заметно существенное различие фоновых условий при включенном и выключенном реакторе для исследовательских ядерных реакторов, что показали измерения для PROSPECT (Рис. 2).

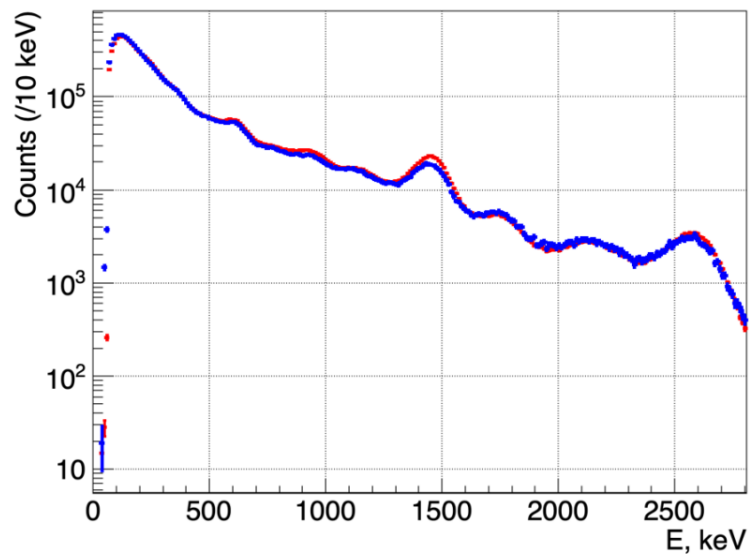


Рисунок 1 - Энергетический спектр фона измеренный коллаборацией РЭД-100

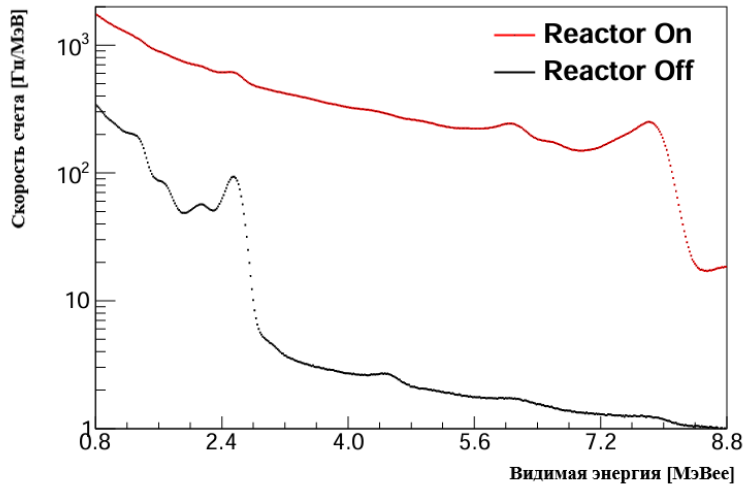


Рисунок 2 - Энергетический спектр фона измеренный коллаборацией Prospect

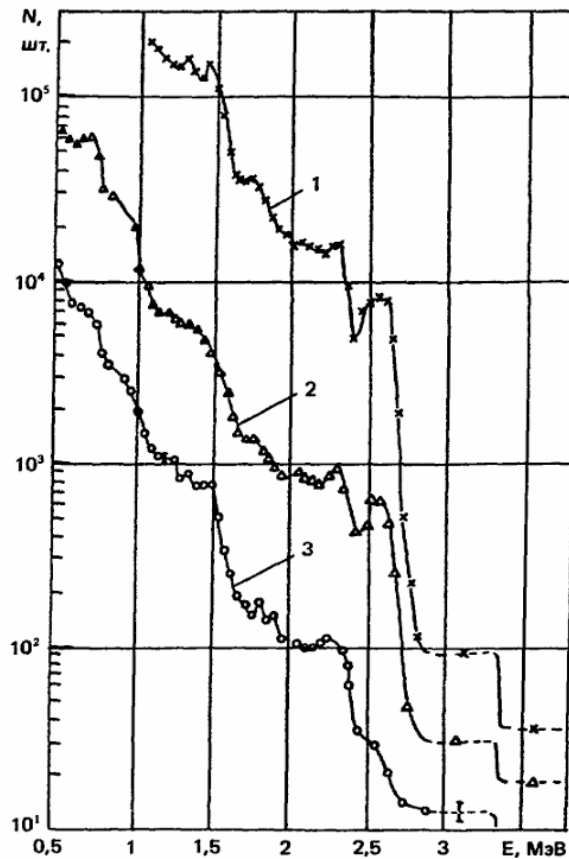


Рисунок 3 - Энергетический спектр фона в подземной нейтринной лаборатории на Ровенской АЭС, измеренный с помощью кристалла NaI(Tl), помещенного: 1-в коридоре; 2-в экспериментальном зале; 3-внутри защитного дома

Основными материалами, дающими вклад в фон на АЭС, являют-

ся бетон, стальные конструкции и изотопы нарабатываемые в реакторе, в течение его работы. [19, 20]

2. СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ γ -ФОНА

2.1 Анализ экспериментальных данных

Для создания модели фона были проанализированы экспериментальные измерения в подреакторном помещении энергоблока №3 КАЭС. Измерения были проделаны с помощью спектрометра на основе неорганического сцинтиллятора NaI(Tl) цилиндрической формы (Рис.4). Размеры кристалла неорганического сцинтиллятора составляют $\varnothing 9\text{см} \times 9\text{см}$.



Рисунок 4 - Внешний вид сцинтилляционного детектора на основе NaI(Tl)

Всего было проделано 4 серии измерений по 1800 секунд, по 2 в 1 день, точки в которых проводились измерения показаны на рис.5.

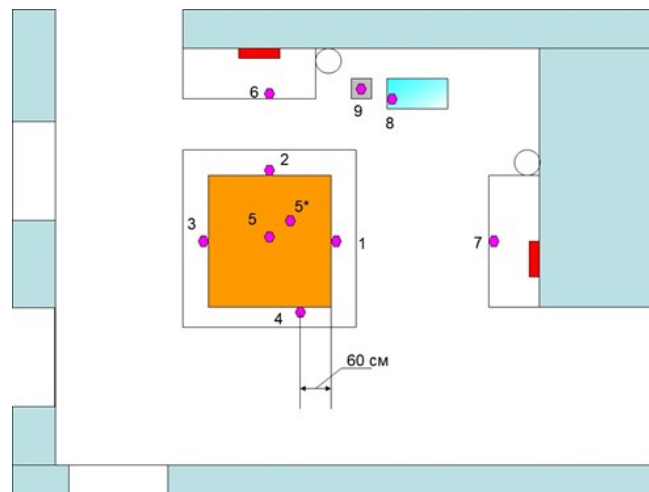


Рисунок 5 - Схематическое изображение точек измерения в помещении ЗА-121/1 3 энергоблока КАЭС, вид сверху. Оранжевым квадратом изображен детектор iDream

Итоговый спектр (Рис.6) γ -фона представляет из себя усредненный спектр по всем точкам и датам измерения. Из итогового спектра вычтен собственный фон, набранный в свинцовом "домике с толщиной стенок 10 см.

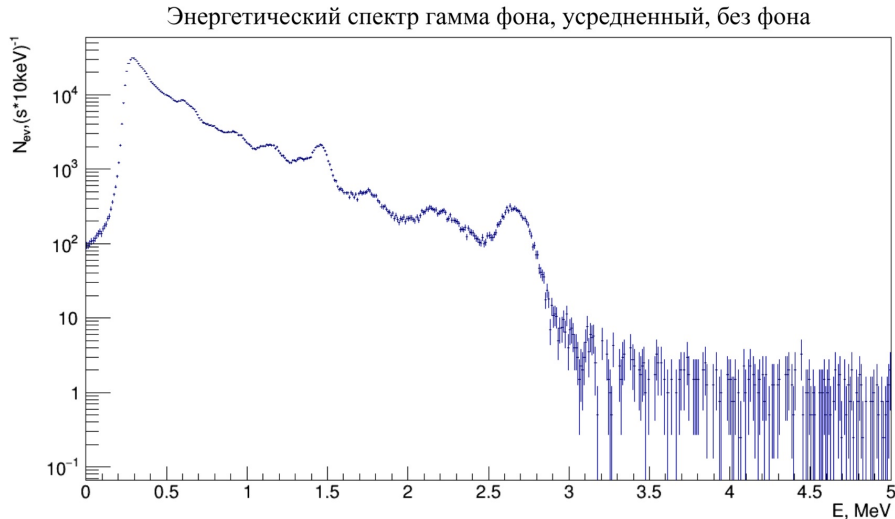


Рисунок 6 - Спектр γ -фона в помещении ЗА-121/1, усредненный, без собственного фона детектора

2.2 Моделирование отклика детектора в Geant4

Для моделирования фона методом Монте-Карло использовался программный пакет Geant4 [21–23]. Была создана геометрия состоящая из ци-

линдра NaI(Tl) диаметром 9 см и высотой 9 см и бетонной сферы внутренним радиусом 100 см и толщиной 50 см (Рис. 7а). В данной бетонной сфере были разыграны равновероятно по всему объёму изотопы разных атомов с изотропным угловым распределением. Для каждого изотопа был задан порог времени моделирования распада не превышающий время жизни Вселенной (Рис.7б). Таким образом, все радиоактивные ряды были приняты за равновесные.

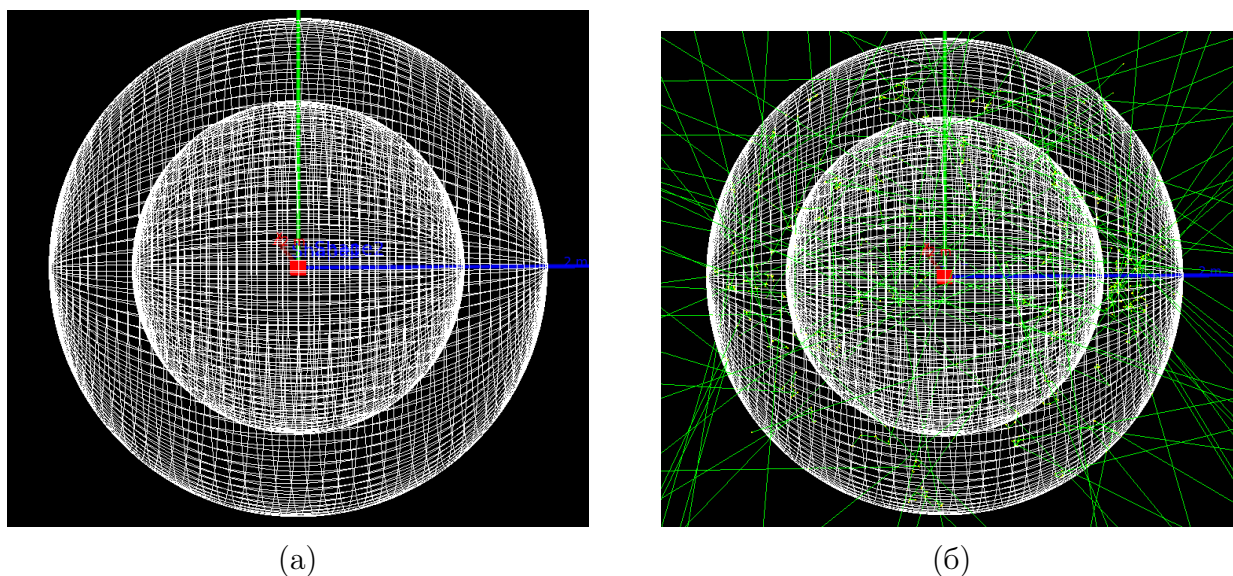


Рисунок 7 - (а) Геометрия, использованная при моделировании. По центру расположен NaI(Tl)(красный), вокруг него бетонная сфера толщиной 50 см на расстоянии 1 метр от центра сцинтиллятора; (б) Моделирование 100 распадов К-40 с изотропным угловым распределением по всему объёму сферы.

Возможность сферической аппроксимации подреакторного помещения объясняется тем, что спектрометр собирал статистику в разных точках помещения и, следовательно, был подвержен излучению со всех направлений, что позволяет в приближении представить геометрию в виде сферы.

При моделировании производилась запись данных в древовидный список `ntuple`, в отдельный файла `.root`. Данные представляли из себя информацию о том какую энергию выделила каждая частица, попавшая в объём сцинтиллятора NaI(Tl). Для ускорения моделирования электроны, позитроны и α -частицы, которые рождались вне объёма сцинтиллятора, уничтожались и не моделировались, так как длина пробега данных частиц и наличие в реальном эксперименте алюминиевой защиты у сцинтиллятора делает их

вклад пренебрегаемым при моделировании.

В качестве первоначальных изотопов для моделирования были выбраны Cs-137, Co-60, K-40, а также цепочки распада U-238 (Рис.8а) И Th-232 (Рис.8б). Данный выбор был сделан на основании различных пиков в спектре γ -фона, энергии которых соответствовали характерным энергиям пиков для перечисленных выше изотопов (табл.1). Для каждого из изотопов было сделано отдельное моделирование 100 миллионов событий в бетонной оболочке.

Изотоп	$E_{\text{табл}}$, кэВ
^{137}Cs	661,7
^{60}Co	1173,2
^{60}Co	1332,5
^{40}K	1460,8
^{238}U	1764,5(^{214}Bi)
^{232}Th	2614(^{208}Tl)

Таблица 1 - Энергии характерных пиков для использованных при моделировании изотопов

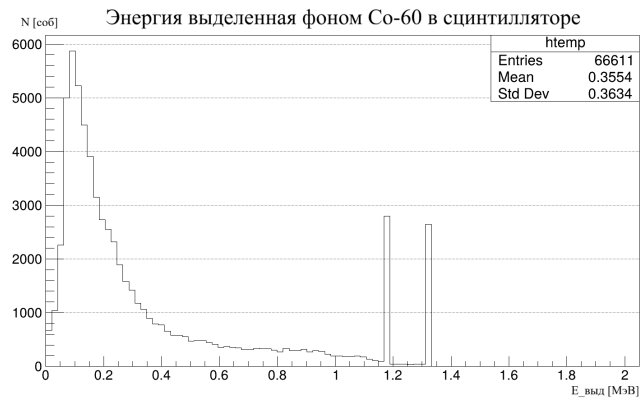


Рисунок 10 - Спектр γ -фона от ^{60}Co без энергетического расширения

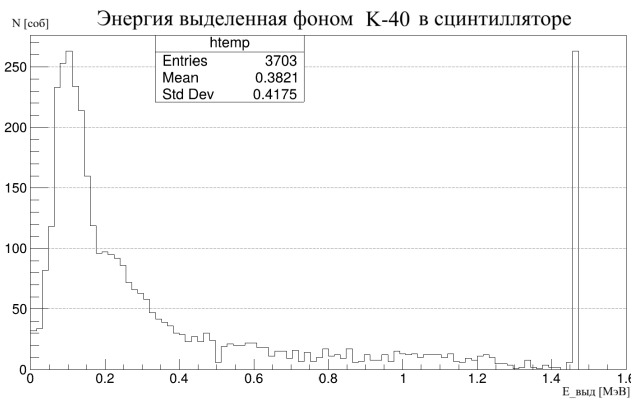


Рисунок 11 - Спектр γ -фона от ^{40}K без энергетического расширения



Рисунок 12 - Спектр γ -фона от ^{238}U без энергетического расширения

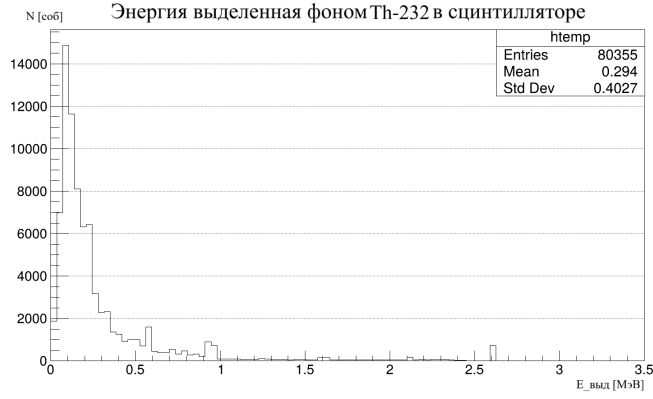


Рисунок 13 - Спектр γ -фона от ^{232}Th без энергетического расширения

2.3 Поиск модели γ -фона в помещении на основе данных моделирования

Для проверки согласия модели с экспериментальными данными в области энергий 0,3-2,9 МэВ требовалось решить задачу оптимизации. Для этого использовались алгоритмы Simplex, ConjugateFR, Scan в составе программы ROOT [24]. Уровень согласования проверялся с помощью χ^2 , вычисленного по формуле (2) [25] и стремящегося к 1 для наиболее точной модели.

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

,где $N_{\text{мод}}$ - 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 - число бинов в которых проверяется согласование. Стандартные отклонения определяются статистически по формуле $\sigma = \sqrt{N(E)}$, поэтому согласование проверяется для бинов, где число событий больше 10.

Для каждого изотопа, в модели предусмотрено свое стандартное отклонение энергии события. σ вычислялось по формуле (3),

$$\sigma_k = \sqrt{a^2 + b^2 E_k + c^2 E_k^2} \quad (3)$$

,где k - тип изотопа (Cs,Co,K,U,Th), a,b,c - варьируемые свободные параметры энергетического разрешения, E - энергия выделившаяся в ходе события. Далее, используя нормальное распределение с вычисленным параметром σ_k , энергии каждого отдельного события в $ntuple$ были "размыты" разным образом для каждого изотопа. Поэтому в модели из 24 параметров - 15 свободных параметров относятся к энергетическому разрешению всех изотопов.

Функция отклика была подобрана следующим образом (4):

$$E_{exp} = a + bE_{vis} + cE_{vis}^2 + dE_{vis}^3 \quad (4)$$

,где E_{exp} - экспериментально наблюдаемая энергия, E_{vis} - энергия выделившаяся в детекторе, a,b,c,d - варьируемые параметры.

Оставшиеся 5 свободных параметров использовались для масштабирования смоделированных гистограмм, после учета размытия энергии и функции отклика детектора.

Таким образом, используя различные алгоритмы решения задачи оптимизации (Simplex, ConjugateFR, Scan Minuit2), итеративным методом удалось добиться $\chi^2/ndf = 502.954 / 260 \approx 1,9$ (рис. 14). Достигнуто это было с помощью параметров указанных в табл.2-4.

Параметр	a^2 , МэВ ²	b^2 , МэВ	c^2 , 1
σ_{Cs}	1.59041×10^{-3}	5.08107×10^{-7}	1.34047×10^{-4}
σ_{Co}	1.9478×10^{-3}	7.9825×10^{-5}	1.82038×10^{-4}
σ_K	1.48333×10^{-3}	2.30582×10^{-6}	1.01396×10^{-4}
σ_U	8.94184×10^{-3}	4.7249×10^{-3}	8.58505×10^{-6}
σ_{Th}	4.03218×10^{-3}	7.12412×10^{-4}	1.6427×10^{-4}

Таблица 2 - Параметры стандартных отклонений для каждого из использованных в модели изотопов

Параметр	a , МэВ	b , 1	c , МэВ ⁻¹	d , МэВ ⁻²
Отклик E	$-1.72052 \cdot 10^{-3}$	1.00794	$5.49497 \cdot 10^{-5}$	$2.56723 \cdot 10^{-4}$

Таблица 3 - Параметры функции отклика

Параметр	Значение
M_{Cs}	$5.04 \pm 0,01$
M_{Co}	$1.83 \pm 0,01$
M_K	$55.06 \pm 0,01$
M_U	$19.99 \pm 0,01$
M_{Th}	$9.95 \pm 0,01$

Таблица 4 - Значения параметров масштабирования гистограмм изотопов

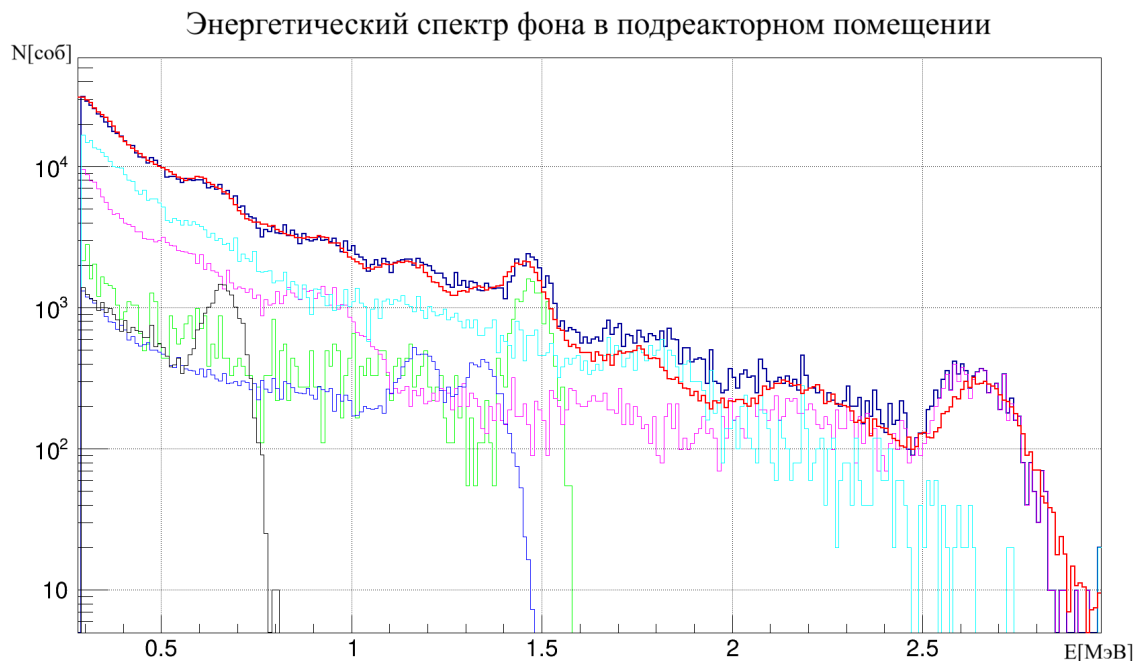


Рисунок 14 - Дифференциальные энергетические спектры γ -фона экспериментальный (красный) и смоделированный (тёмно синий) с показанными вкладами отдельных изотопов, где Cs137 - черный, Co60 - синий, K40 - зеленый, ряд U238 - голубой, ряд Th232 - розовый

Используя коэффициенты масштабирования из модели, и вычислив массу сферы для бетона марки М500 были получены следующие активности изотопов в модели, $A_{\text{мод}}$ в Бк/кг (табл.3). Также данные удельные активности были соотнесены с типичными удельными активностями изотопов в бетоне, который используют при строительстве жилых домов, $A_{\text{бет}}$.

ИЗОТОП	$A_{\text{мод}}, \text{Бк/кг}$	$A_{\text{бет}}, \text{Бк/кг}$
^{137}Cs	$10,80 \pm 0,02$	<1
^{60}Co	$4,88 \pm 0,02$	-
^{40}K	$105,09 \pm 0,02$	354,4
^{238}U	$43,69 \pm 0,02$	24,5
^{232}Th	$22,21 \pm 0,02$	37,3

Таблица 5 - Удельные активности изотопов в фоне подреакторного помещения ($A_{\text{бет}}, \text{Бк/кг}$ - удельная активность изотопов в бетоне) [26, 27]

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проанализировав экспериментальные измерения γ -фонов в подреакторных помещениях был выбран набор изотопов, который применялся для анализа экспериментальных данных с энергоблока №3 КАЭС. Для данных изотопов было проведено моделирование отклика детектора, на основе NaI(Tl), методом Монте-Карло в Geant4. Смоделированные данные были использованы для решения задачи оптимизации при проверке согласования экспериментальных данных с моделью. Используя ряд алгоритмов программы ROOT удалось добиться согласия $\chi^2/ndf \approx 1,9$. Из полученных параметров модели был сделан расчет удельных активностей изотопов в составе бетона подреакторного помещения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Freedman Daniel Z. Coherent effects of a weak neutral current // Physical Review D. — 1974. — Vol. 9, no. 5. — P. 1389.
2. The COHERENT Experimental Program : Rep. : arXiv:2204.04575 [hep-ex] / arXiv ; executor: Akimov D., Alawabdeh S., An P. et al. : 2022. — URL: <https://arxiv.org/abs/2204.04575>.
3. Measurement of the Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering Cross Section on CsI by COHERENT / Akimov D., An P., Awe C., et al. // [Physical Review Letters](#). — 2022. — Vol. 129.
4. First observation of reactor antineutrinos by coherent scattering. — 2025. — [2501.05206](#).
5. First Indication of Solar ^8B Neutrino Flux through Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering in PandaX-4T : Rep. : arXiv:2407.10892 [hep-ex] / arXiv ; executor: PandaX Collaboration, Bo Zihao, Chen Wei et al. : 2024. — URL: <https://arxiv.org/abs/2407.10892>.
6. Упругое когерентное рассеяние нейтрино на атомном ядре—недавно обнаруженный тип взаимодействия нейтрино низких энергий / Акимов Д. Ю., Белов В. А., Болоздыня А. И. и др. // Успехи физических наук. — 2019. — С. 55–93.
7. Detailed nuclear structure calculations for coherent elastic neutrino-nucleus scattering / Khaleq Raghda Abdel, Newstead Jayden L., Simenel Cedric, and Stuchbery Andrew E. // [Physical Review D](#). — 2025. — Feb. — Vol. 111, no. 3. — Access mode: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.111.033003>.
8. Lindner Manfred, Rink Thomas, Sen Manibrata. Light vector bosons and the weak mixing angle in the light of future germanium-based reactor

- CEvNS experiments // [Journal of High Energy Physics](#). — 2024. — Aug. — Vol. 2024, no. 8. — Access mode: [http://dx.doi.org/10.1007/JHEP08\(2024\)171](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP08(2024)171).
9. Biassoni M., Martinez C. Study of supernova ν -nucleus coherent scattering interactions // [Astroparticle Physics](#). — 2012. — Aug. — Vol. 36, no. 1. — P. 151–155. — Access mode: <http://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2012.05.009>.
 10. First upper limits on neutrino electromagnetic properties from the CONUS experiment / Bonet H., Bonhomme A., Buck C., Fülber K., Hakenmüller J., Hempfling J., Heusser G., Hugle T., Lindner M., Maneschg W., Rink T., Strecker H., and Wink R. // [The European Physical Journal C](#). — 2022. — Sep. — Vol. 82, no. 9. — Access mode: <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10722-1>.
 11. Coherent elastic neutrino-nucleus scattering: Terrestrial and astrophysical applications : Rep. : arXiv:2203.07361 [hep-ph] / arXiv ; executor: Abdullah M., Abele H., Akimov D. et al. : 2022. — URL: <https://arxiv.org/abs/2203.07361>.
 12. Pandey Vishvas. Recent progress in low energy neutrino scattering physics and its implications for the standard and beyond the standard model physics // [Progress in Particle and Nuclear Physics](#). — 2024. — Jan. — Vol. 134. — P. 104078. — Access mode: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pnnp.2023.104078>.
 13. Formaggio J. A., Zeller G. P. From eV to EeV: Neutrino cross sections across energy scales // [Reviews of Modern Physics](#). — 2012. — Sep. — Vol. 84, no. 3. — P. 1307–1341. — Access mode: <http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.84.1307>.
 14. Carey S., Pandey V. Low-Energy Neutrino-Nucleus Scattering and New Physics. — 2024. — [2412.18055](#).

15. Жутиков И. Литвинович Е. Хватов В. Влияние учета детальной геометрии активной зоны на поток антинейтрино от реактора ВВЭР-1000 // [Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики](#). — 2024. — 12. — Т. 119. — С. 158–165.
16. Characterization of the ambient background in the RED-100 experiment location at Kalinin Nuclear Power Plant. — 2023. — [2311.00870](#).
17. The PROSPECT reactor antineutrino experiment / Ashenfelter J., Balantekin A. B., Baldenegro C., et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2019. — Vol. 922. — P. 287–309. — DOI: 10.1016/j.nima.2018.12.079.
18. The PROSPECT physics program / Ashenfelter J., Balantekin A. B., Band H. R., et al. // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. — 2016. — Vol. 43, no. 11. — P. 113001. — DOI: 10.1088/0954-3899/43/11/113001.
19. Full background decomposition of the CONUS experiment / Bonet H., Bonhomme A., Buck C., et al. // The European Physical Journal C. — 2023. — Vol. 83, no. 3. — P. 195. — DOI: 10.1140/epjc/s10052-023-11240-4.
20. Background radiation measurements at high power research reactors / Ashenfelter J., Balantekin B., Baldenegro X., et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2016. — Vol. 806. — P. 401–419. — DOI: 10.1016/j.nima.2015.10.023.
21. Recent developments in Geant4 / Allison J., Amako K., Apostolakis J., et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2016. — Vol. 835. — P. 186–225. — DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.125.

22. Geant4—a simulation toolkit / Agostinelli S., Allison J., Amako K., et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2003. — Vol. 506, no. 3. — P. 250–303. — DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
23. Geant4 developments and applications / Allison J., Amako K., Apostolakis S., et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 2006. — Vol. 53, no. 1. — P. 270–278. — DOI: 10.1109/TNS.2006.869826.
24. ROOT — A C++ framework for petabyte data storage, statistical analysis and visualization / Antcheva I., Ballintijn M., Bellenot B., et al. // Computer Physics Communications. — 2009. — Vol. 180, no. 12. — P. 2499–2512. — DOI: 10.1016/j.cpc.2009.08.005.
25. Barlow Roger, Beeston Christine. Fitting using finite Monte Carlo samples // Computer Physics Communications. — 1993. — Vol. 77, no. 2. — P. 219–228. — DOI: 10.1016/0010-4655(93)90005-W.
26. Ademola J. A., Oguneletu P. O. Radionuclide content of concrete building blocks and radiation dose rates in some dwellings in Ibadan, Nigeria // Journal of Environmental Radioactivity. — 2005. — Vol. 81, no. 1. — P. 107–113. — DOI: 10.1016/j.jenvrad.2004.12.002.
27. Радиационная медицина / Стожаров А. Н., Аветисов А. Р., Квиткевич Л. А. и др. — Минск, 2009. — ISBN 978-985-462-667-3.