

Статус и результаты измерений в эксперименте vGeN



Д.В. Пономарев ^{1,2} от коллаборации vGeN^{1,2,3}

¹ОИЯИ, Дубна, Россия

²ФИАН, Москва,

³IEAR STU, Прага, Чехия

Цели и задачи

Целью **ν GEN** является исследование свойств нейтрино с помощью германиевых детекторов расположенных вблизи энергетического реактора.

Исследования в **ν GEN**:

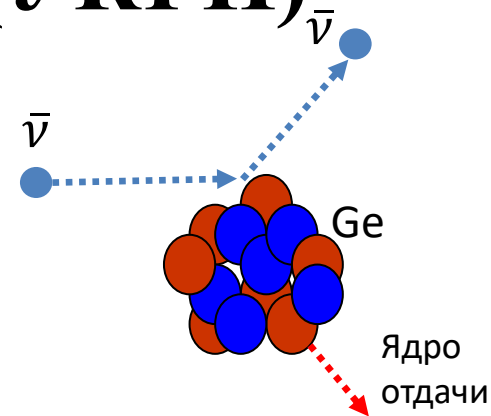
- Поиск когерентного упругого рассеяния реакторных антинейтрино на ядрах вещества (УКРН).
- Поиск магнитного момента нейтрино (ММН)
- Поиск Новой физики через исследование нестандартных взаимодействий нейтрино.
- Определение угла Вайнберга при низких энергиях
- Стерильные нейтрино.

Когерентное рассеяние нейтрино (УКРН)

- Когерентное рассеяние нейтрино – это процесс, предсказанный в рамках Стандартной модели (СМ).
- Никогда не был обнаружен для реакторных нейтрино.
- Детектирование этого процесса является важным тестом СМ.
- Большой интерес к этому процессу вызван еще тем, что с помощью него можно производить поиск нестандартных взаимодействий нейтрино, стерильного нейтрино и другое.

- $E_\nu < 50$ МэВ (области полной когерентности ~ 30 МэВ)
- Сечение рассеяния увеличено на несколько порядков по сравнению с «обычным» рассеянием
- Пропорционально квадрату числа нейтронов N^2
- Энергия отдачи очень мала – меньше нескольких кэВ.
- Зачастую детектирование возможно лишь части оставленной энергии (для HPGe детекторов $\sim 20\%$)

В настоящее время только в эксперименте COHERENT было заявлено об обнаружении УКРН. Однако, эти результаты были получены с достаточно высокоэнергичными нейтрино, в области близкой к пределу когерентности.



$$\sigma_{tot} \approx \frac{G_F^2}{4\pi^2} \cdot N^2 \cdot E_\nu^2$$

$$E_A = \frac{2E^2(1 - \cos\theta)}{2MA}$$

Магнитный момент нейтрино (ММН)

Минимально Расширенная Стандартная
 Модель предсказывает очень малое значение
 магнитного момента для массивных
 нейтрино ($\mu_\nu < 10^{-19} \mu_B$), которое не может
 быть измерено в современных экспериментах.
 Однако, физика за рамками Стандартной
 модели может привести к аномальному
 значению ММН выше, чем $10^{-14} \mu_B$.

Цель – более жёсткий по сравнению с GEMMA
 предел: $< 2.9 \cdot 10^{-11} \mu_B$, 90% C.L.

Experiment	Mass, kg	ν flux, $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	E_{th} , keV _{ee}	Reference
GEMMA	1.5	$2.7 \cdot 10^{13}$	2.8	Adv.High Energy Phys. 2012
ν GeN	1.4	$4.4 \cdot 10^{13}$	0.2-0.3	Phys.Rev.D 106 (2022)

LZ dark matter experiment (solar ν) — $\mu_\nu < 1.5 \cdot 10^{-11} \mu_B$ (90% C.L.)

Astrophysical considerations — $\mu_\nu < 3.0 \cdot 10^{-12} \mu_B$ (90% C.L.)

Phys. Rev. D 107, 053001 (2023)

Astrophys. Journal, 365 559 (1990)

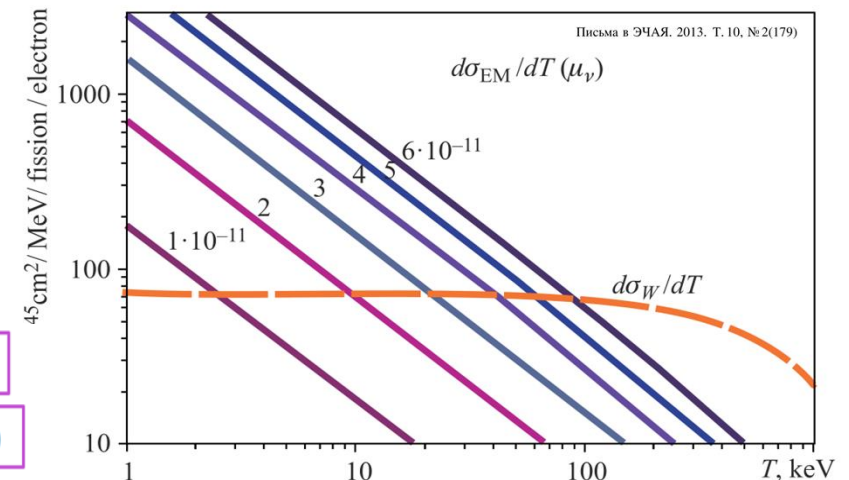
В СМ дополненной правыми нейтрино:

$$\mu_\nu = \frac{3 e G_F}{8 \pi^2 \sqrt{2}} \cdot m_\nu \approx 3 \cdot 10^{-19} \mu_B \cdot \frac{m_\nu}{1\text{eV}}$$

Метод: поиск э/м рассеяния на электронах

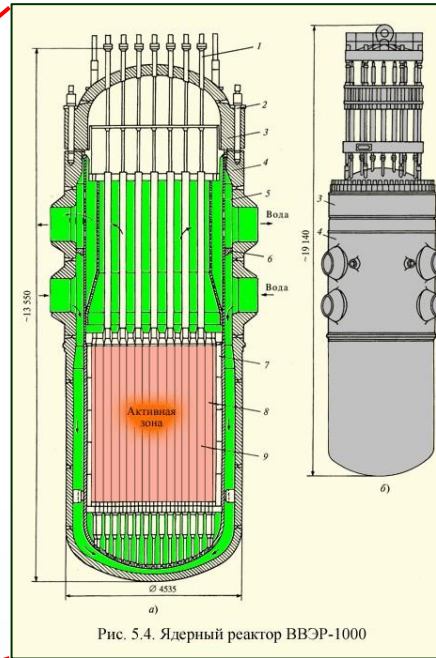
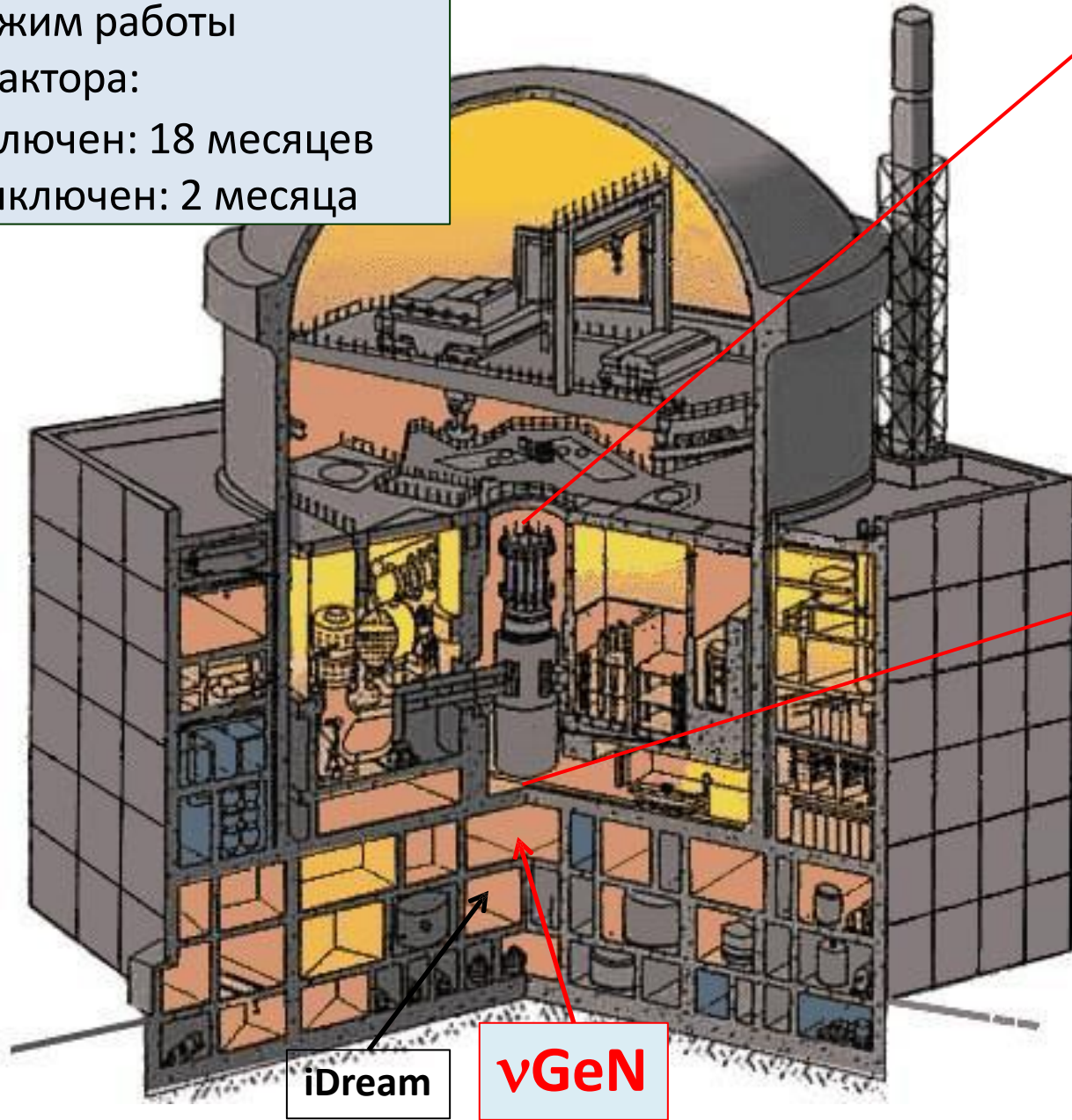
$$\frac{d\sigma_{\text{EM}}}{dT} = \pi r_0^2 \left(\frac{\mu_\nu}{\mu_B} \right)^2 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{E} \right)$$

Сечение $\sim 1/T$, выигрывает от низкого порога



Реактор № 3 КЛНАЭС

Режим работы
реактора:
Включен: 18 месяцев
Выключен: 2 месяца



- Спектрометр **vGeN** расположен под энергоблоком №3 КЛНАЭС (тепловая мощность – 3,1 ГВт) на расстоянии ~11 м от центра активной зоны.
- Поток антинейтрино, проходящий через детектор $> 4 \cdot 10^{13} \nu / (\text{с} \cdot \text{см}^2)$
- Реактор, бетонные конструкции здания и технологическое оборудование обеспечивают защиту от космического излучения ~50 м.в.э.

iDream

vGeN

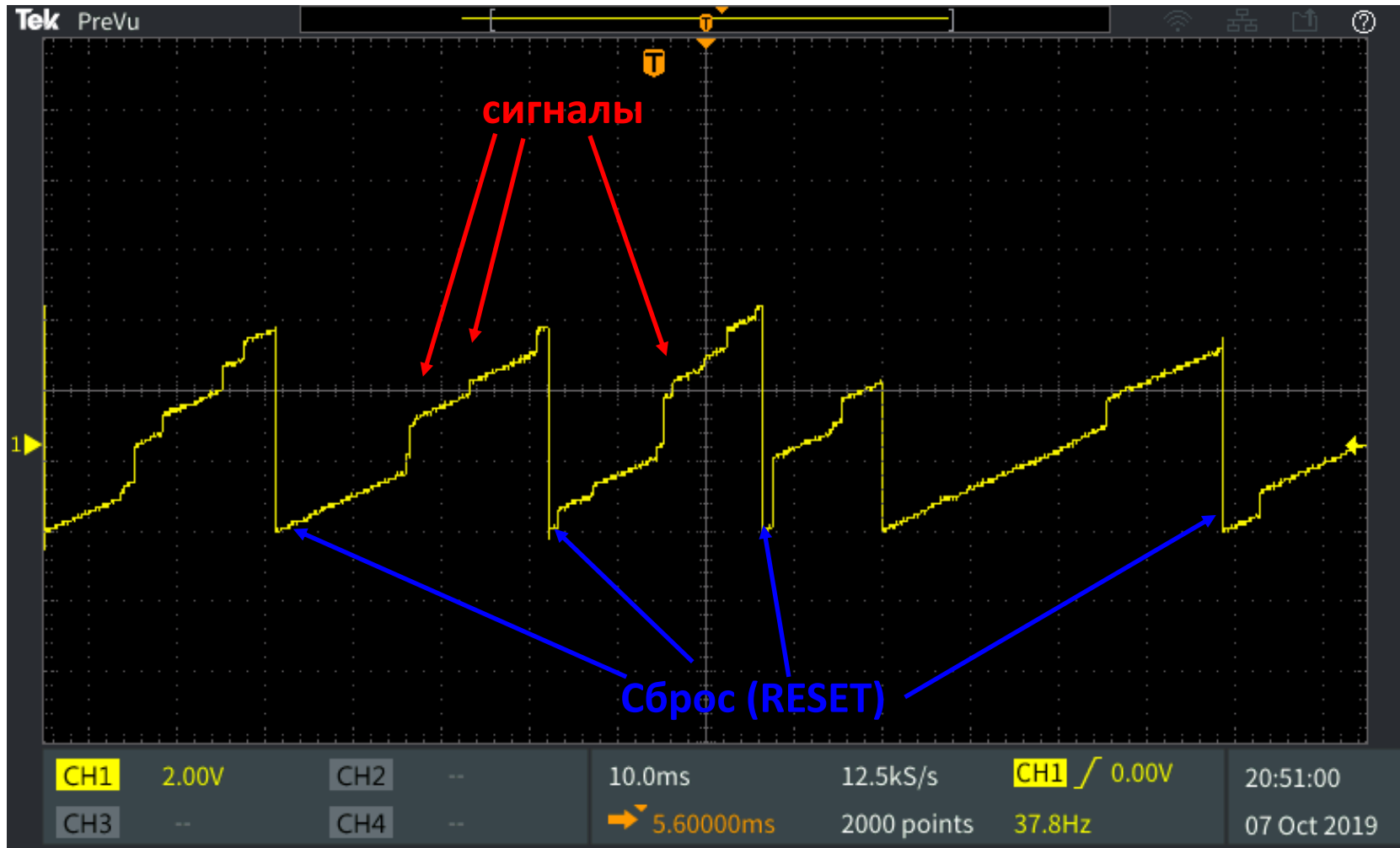
HPGe detector for ν GeN



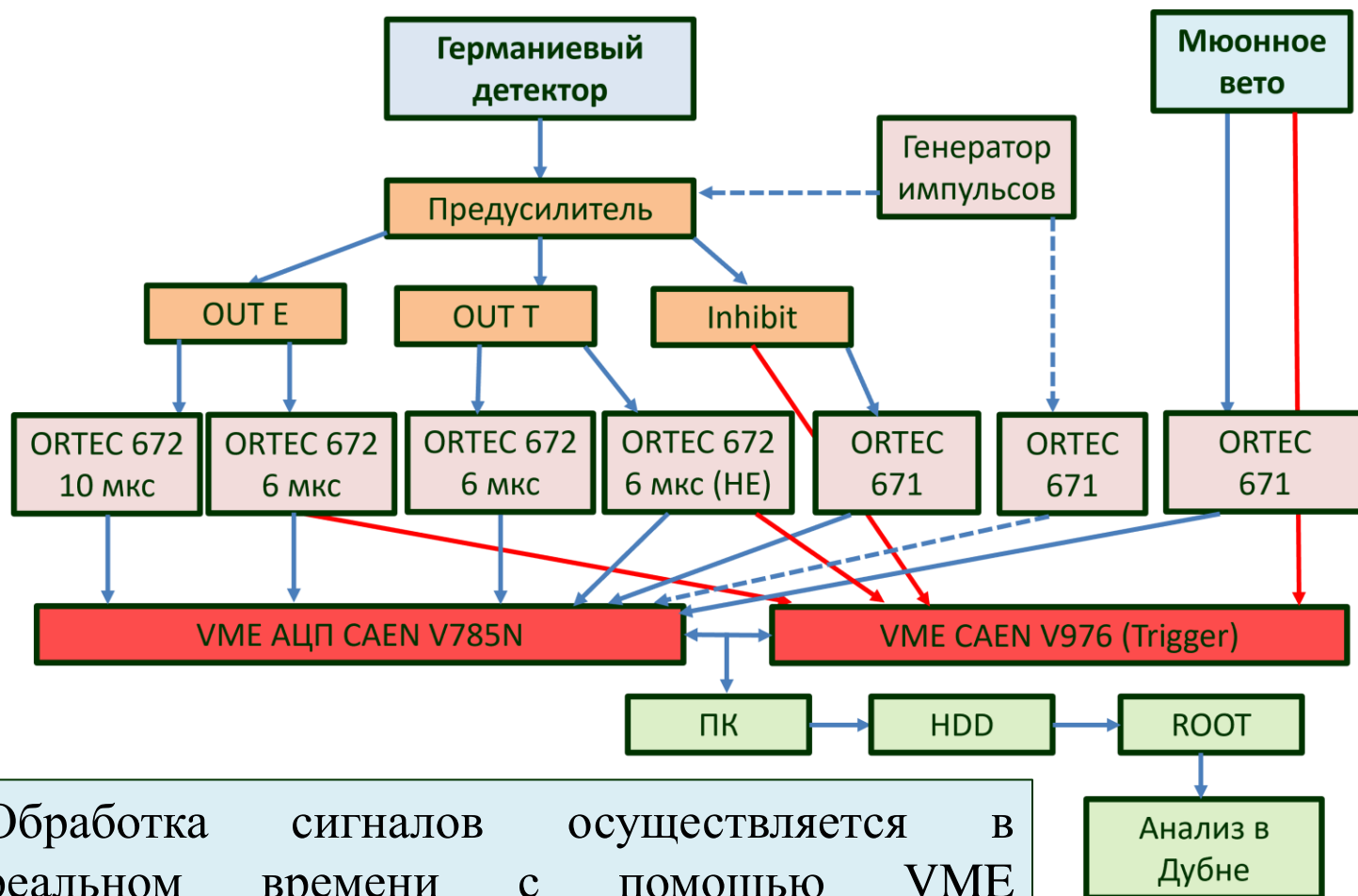
Для детектирования сигнала от нейтрино используется специально разработанный низкофоновый низкопороговый HPGe детектор с точечным контактом производства CANBERRA (Mirion, Lingosheim). Охлаждение детектора осуществляется с помощью криокулера CP5+. Масса детектора 1,4 кг.

Сигналы с детектора

В детекторах используется предусилитель со сбросом сигнала. Типичная частота сброса в фоновых измерениях $\sim 5-30$ Hz. Предусмотрен сигнал запрета (Inhibit) для идентификации нефизических сигналов вызванных сбросом.



Упрощенная схема измерений



Обработка сигналов осуществляется в реальном времени с помощью VME электроники, с использованием усилителей с различными формировками

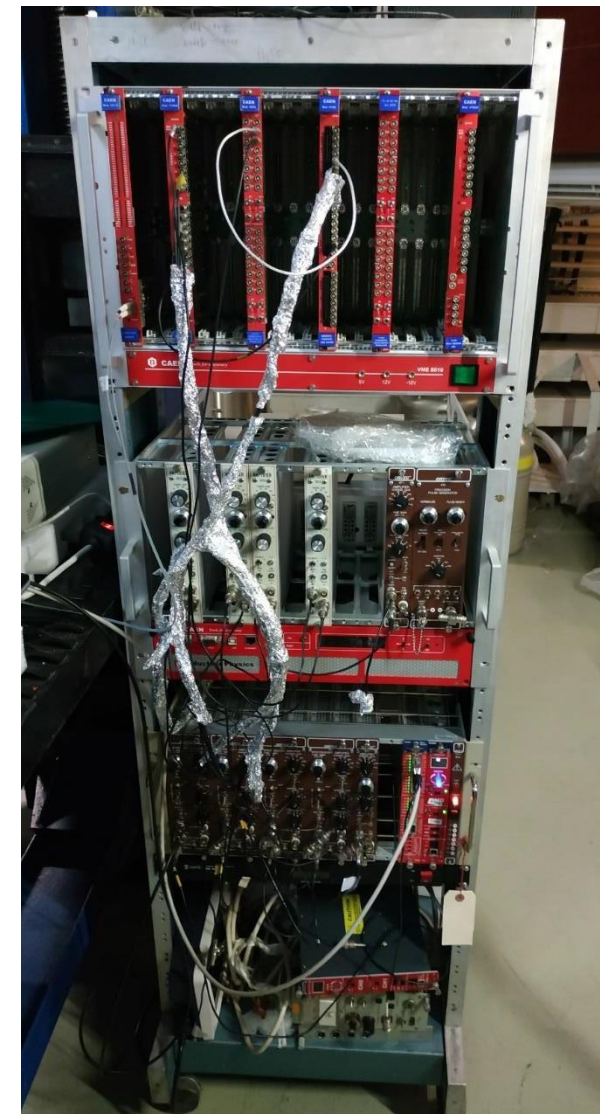
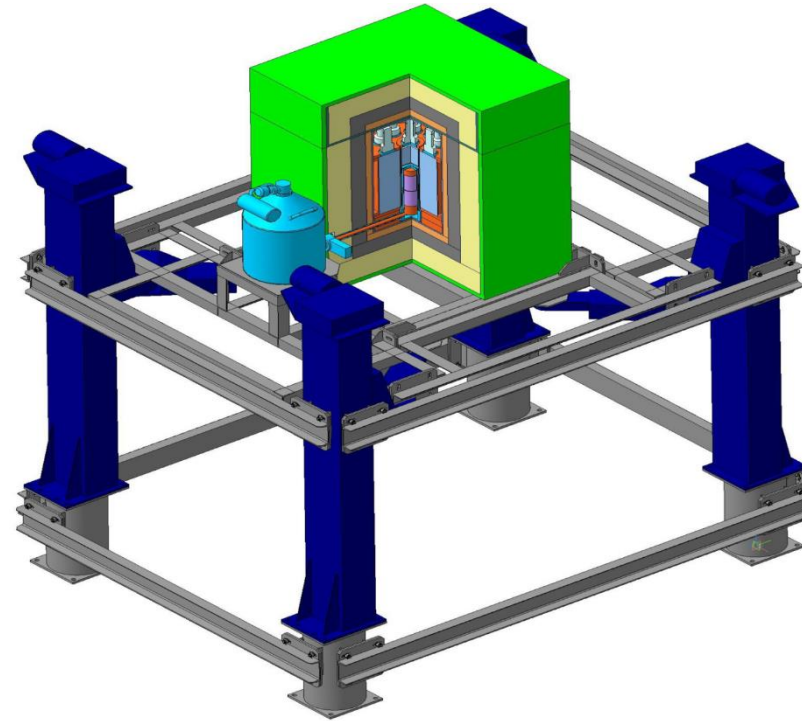
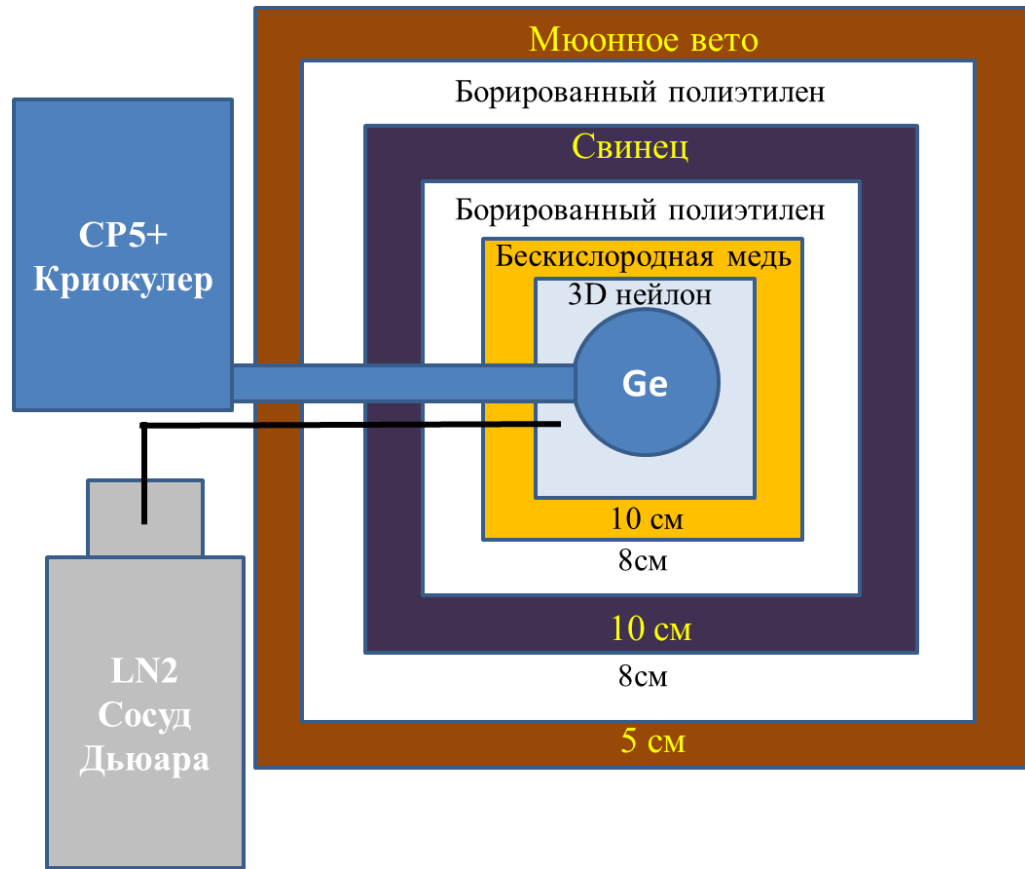


Схема защиты спектрометра и подъемный механизм



Расстояние от детектора до центра активной зоны реактора:

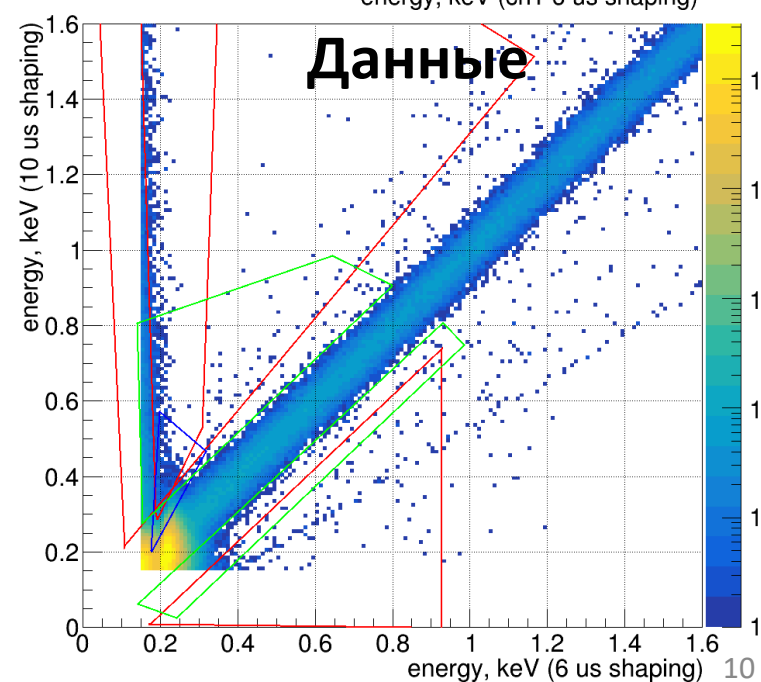
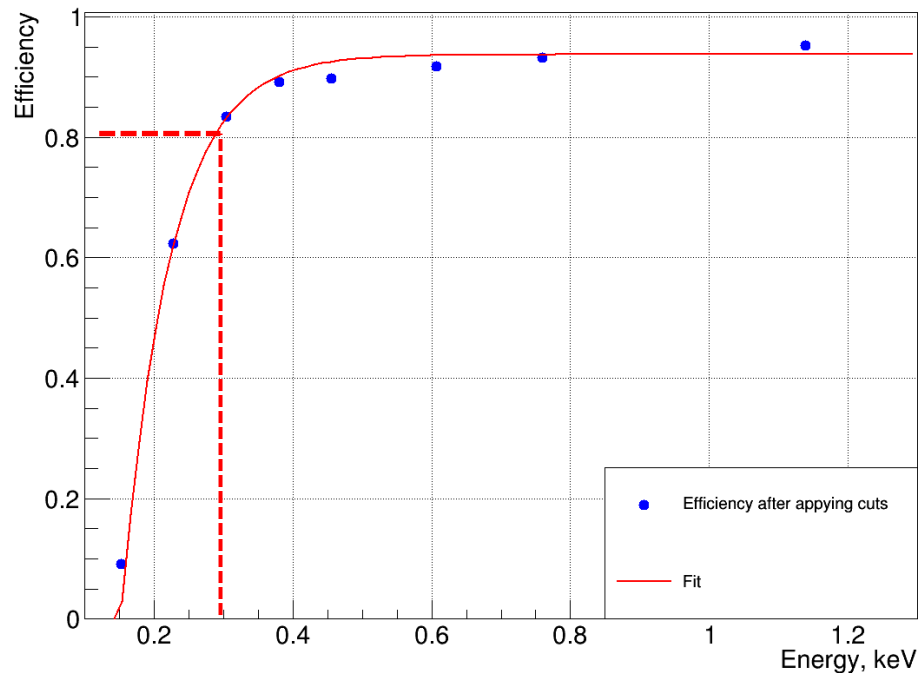
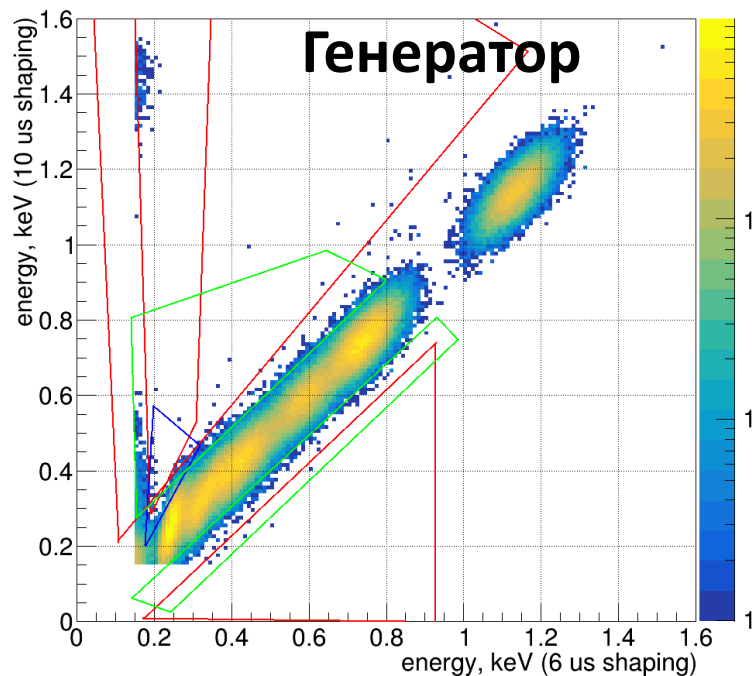
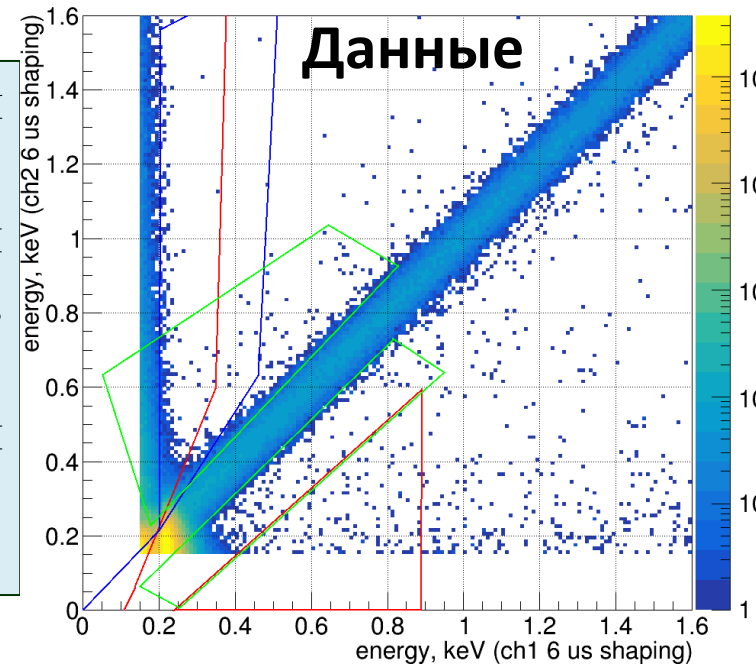
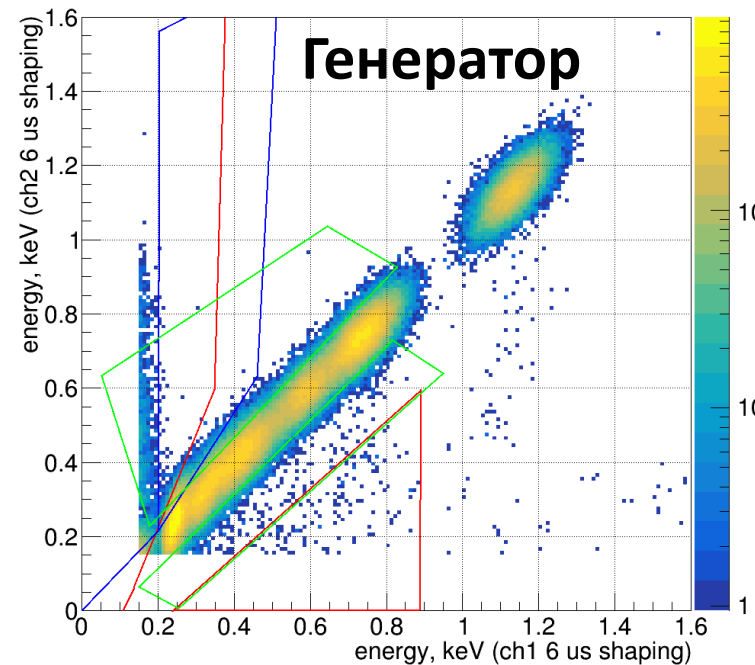
11.1 м -
верхнее
положение

12.5 м -
нижнее
положение

Отсеивание шумов

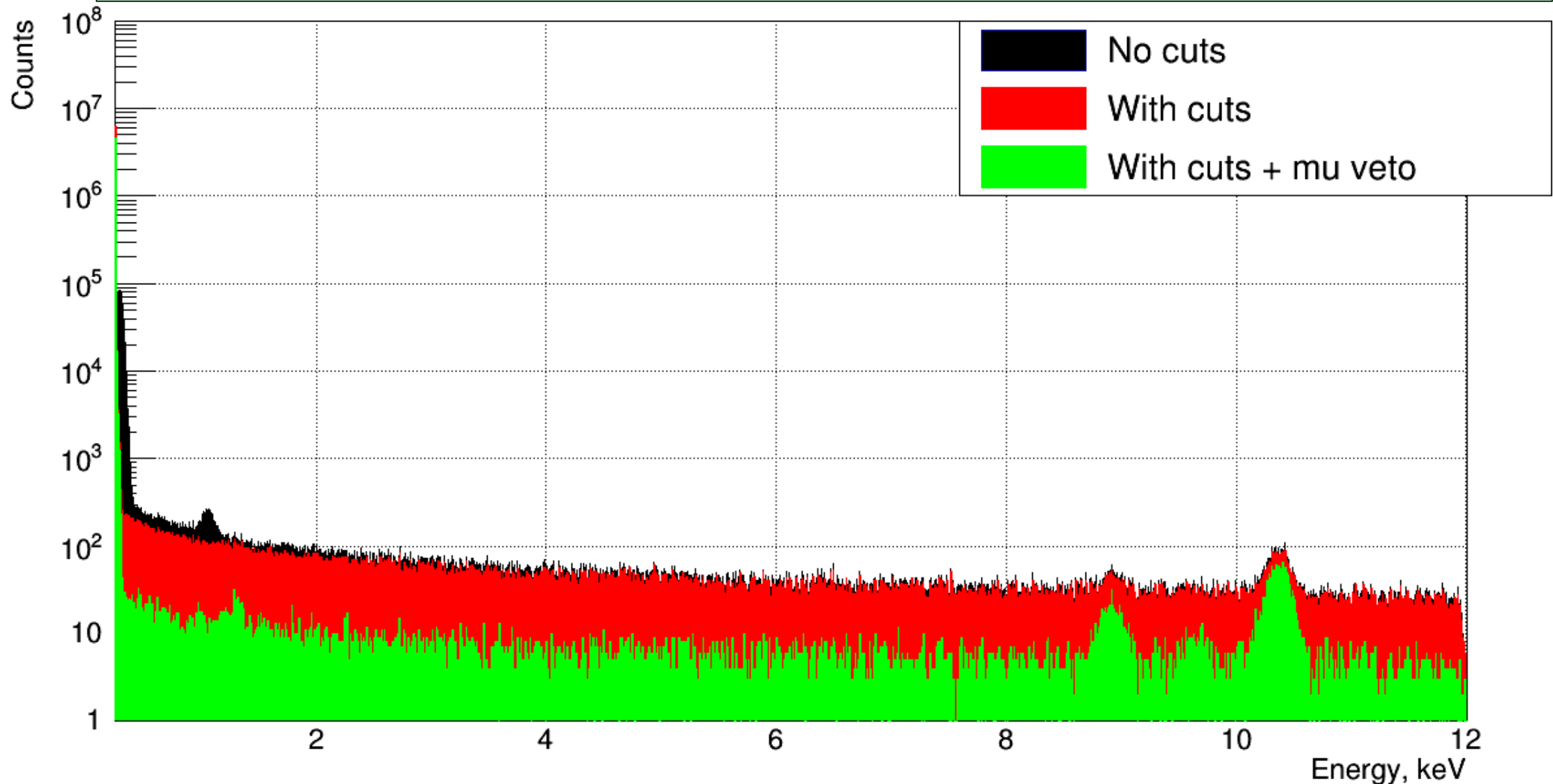
- Для отсеивания шумовых событий используются разные формировки.
- Анализ временного распределения сигналов позволяет убирать события, возникающие при сбросе предусилителя
- Со всеми использованными критериями отбора эффективность составляет $> 40\%$ (для 200 эВ).

Efficiency measured with pulse generator



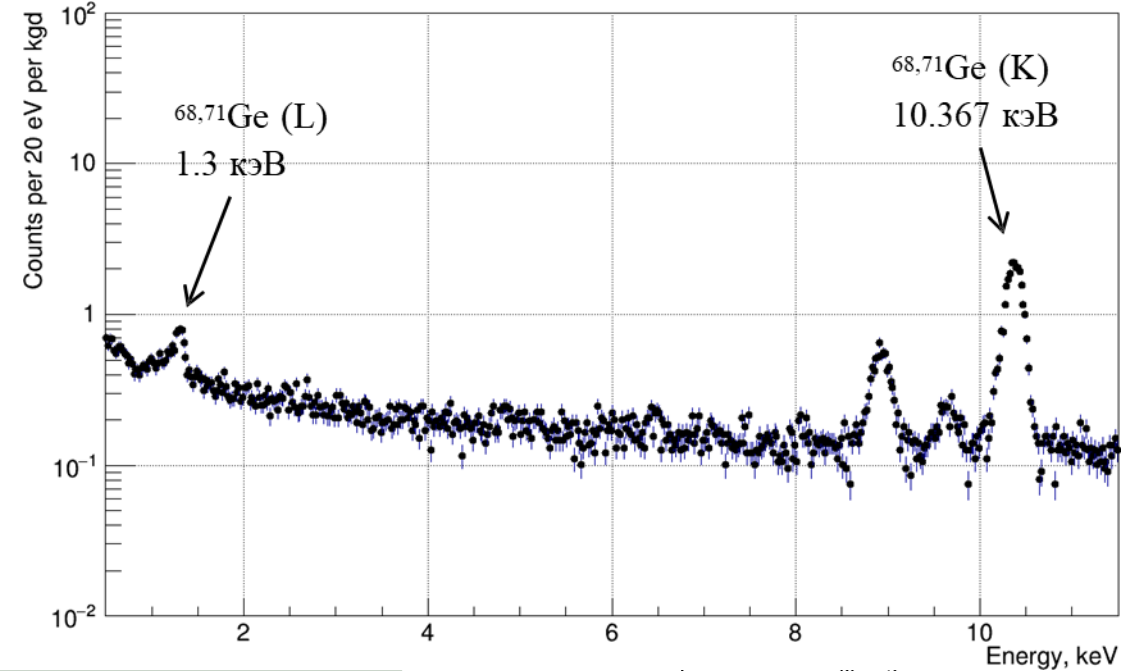
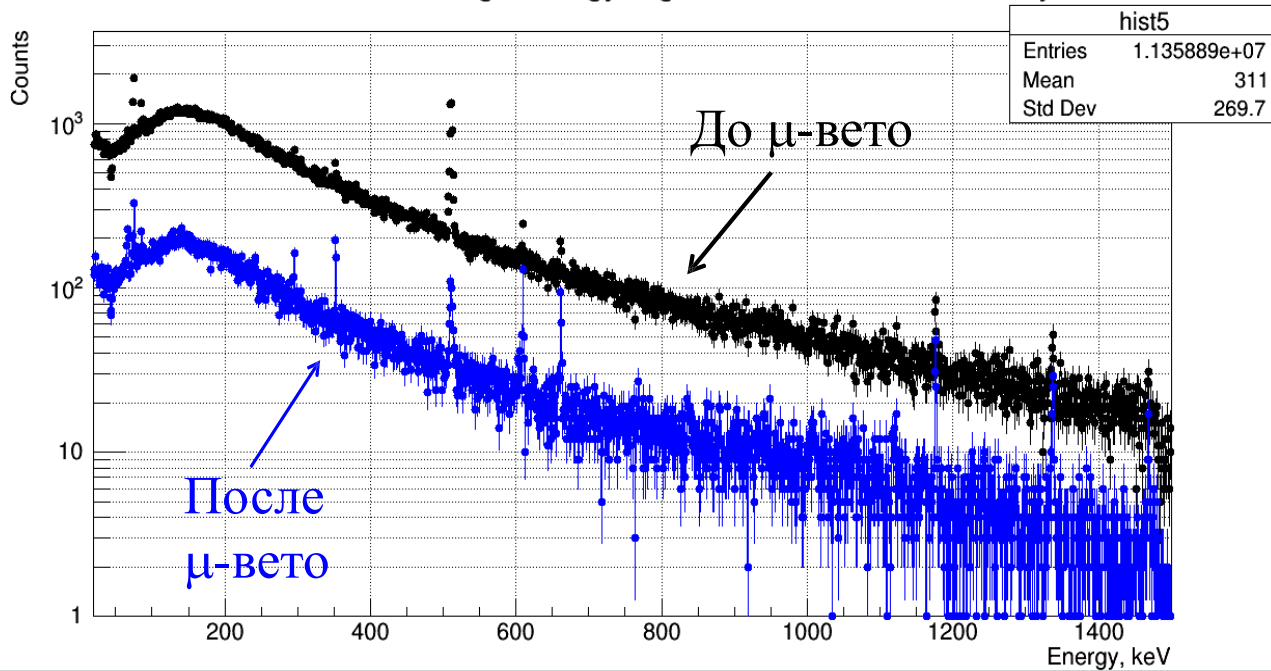
Мюонное вето и отбор сигналов по времени

- Временные совпадения сигналов мюонного вето и в HPGe детектора позволяет исключить из анализа компоненту фона, связанную с космическим излучением.
- Эффективность всех критериев отбора определяется по линии 10.37 кэВ и составляет **85.3(19)%**

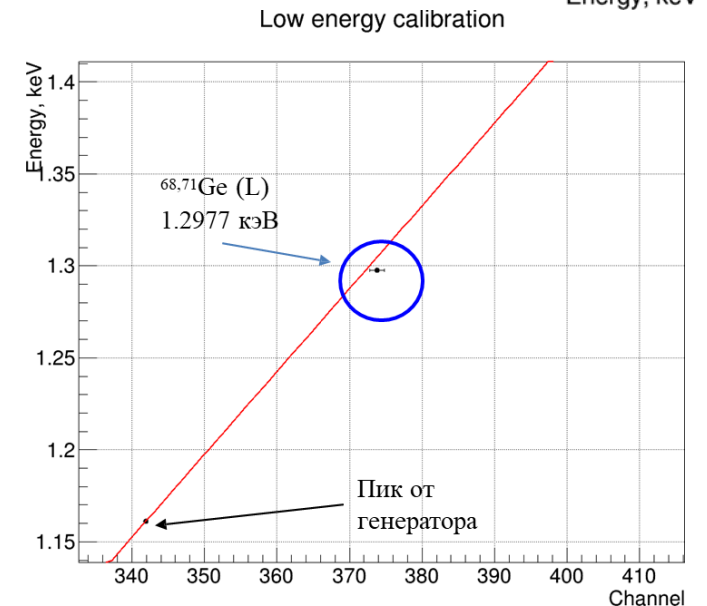


Энергетическая калибровка

Measurements of high energy region with nuGeN, 20.21 days



- Для калибровки высокоэнергетической части спектра используется вольфрамовый сварочный электрод, содержащий 2% тория
- Низкоэнергетическая часть спектра калибруется с помощью генератора импульсов и по космогенной линии 10,37 кэВ.
- Корректность калибровки контролируется по линии 1,3 кэВ.
- Энергетическое разрешение на линии генератора 101.6(5) эВ (ПШПВ).

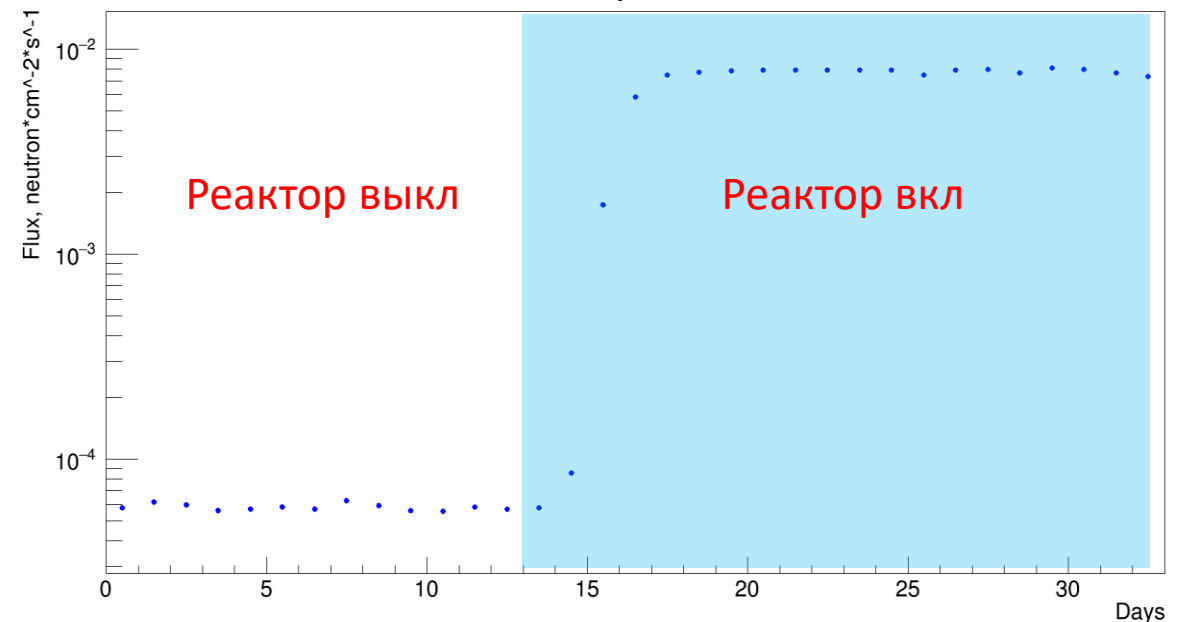


Контроль за условиями измерений

- Стабильные условия измерений очень важны, поскольку нестабильности могут сместить энергетическую шкалу и изменить уровень шумов.
- Температурный режим воздуха вблизи установки стабилизируется тремя кондиционерами. Температура и влажность постоянно контролируются.
- Нейтронный фон вне защиты (быстрый и тепловой) измеряется специальным низкофоновым счетчиком He^3 и NaI детектором.
- Распад косомгенных изотопов в детекторе учитывается при анализе.

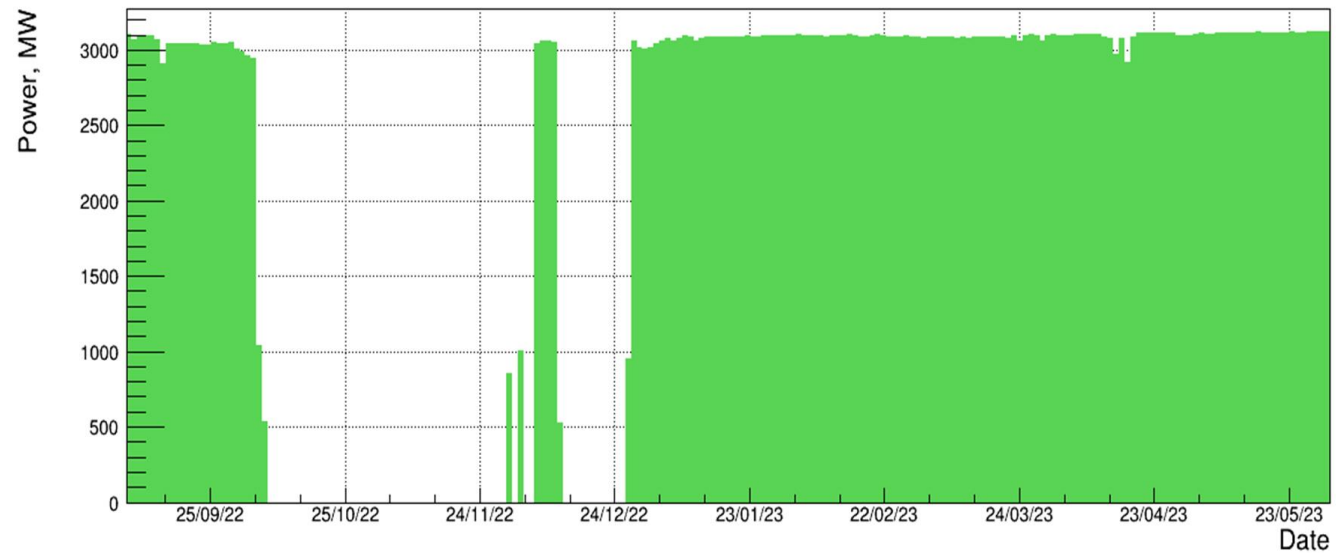
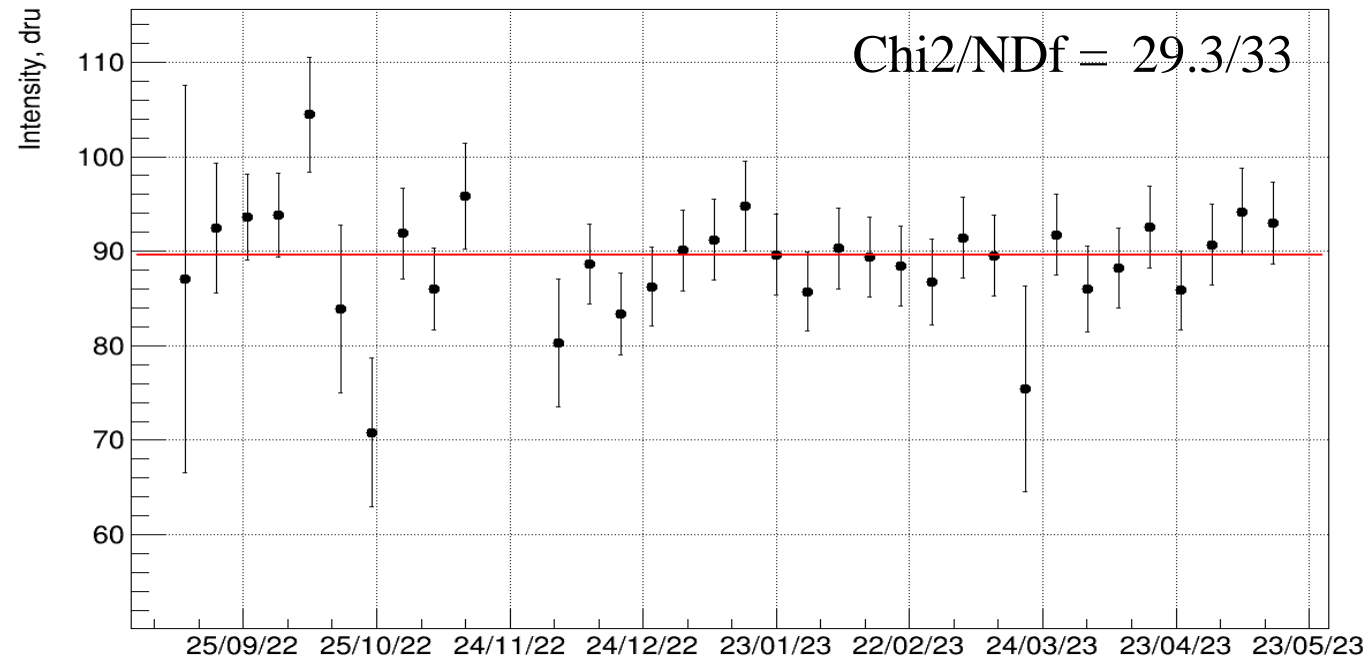


Поток тепловых нейтронов вне защиты



Стабильность (при всех критериях отбора)

Intensities of different energy regions



Анализ 2022 года

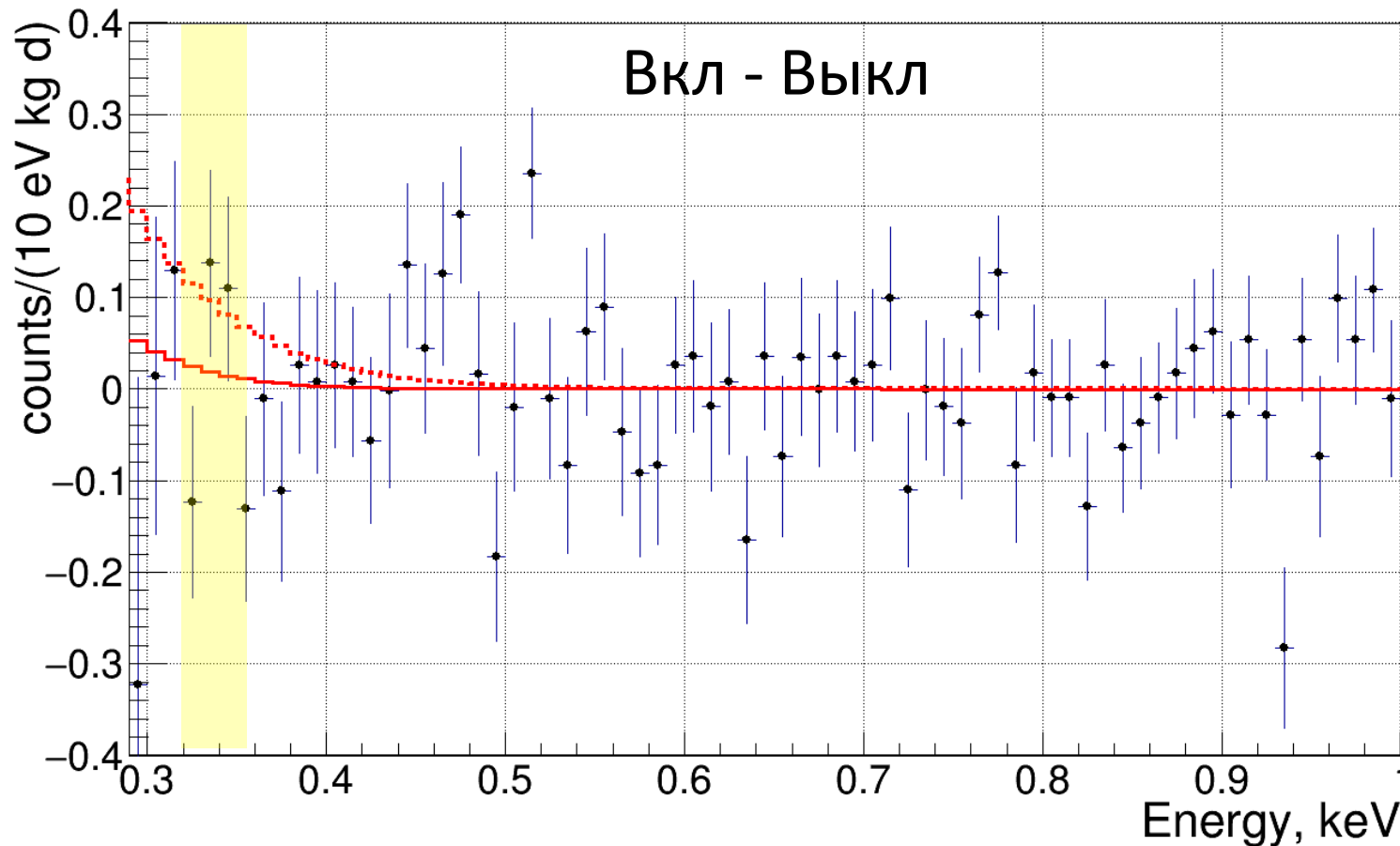
Анализ первых данных не выявил существенной разницы в уровне фона включенном (94 дня) и выключенном реакторе (47 дней). Также не было обнаружено избытка низкоэнергетических событий, связанных с УКРН. Расстояние до центра активной зоны было 11,84 м.

В результате анализа был получен верхний предел на значения «квенчинга» $k < 0,26$ с 90% CL (пунктирная линия). Красная ожидаемый спектр УКРН при $k = 0,179$.

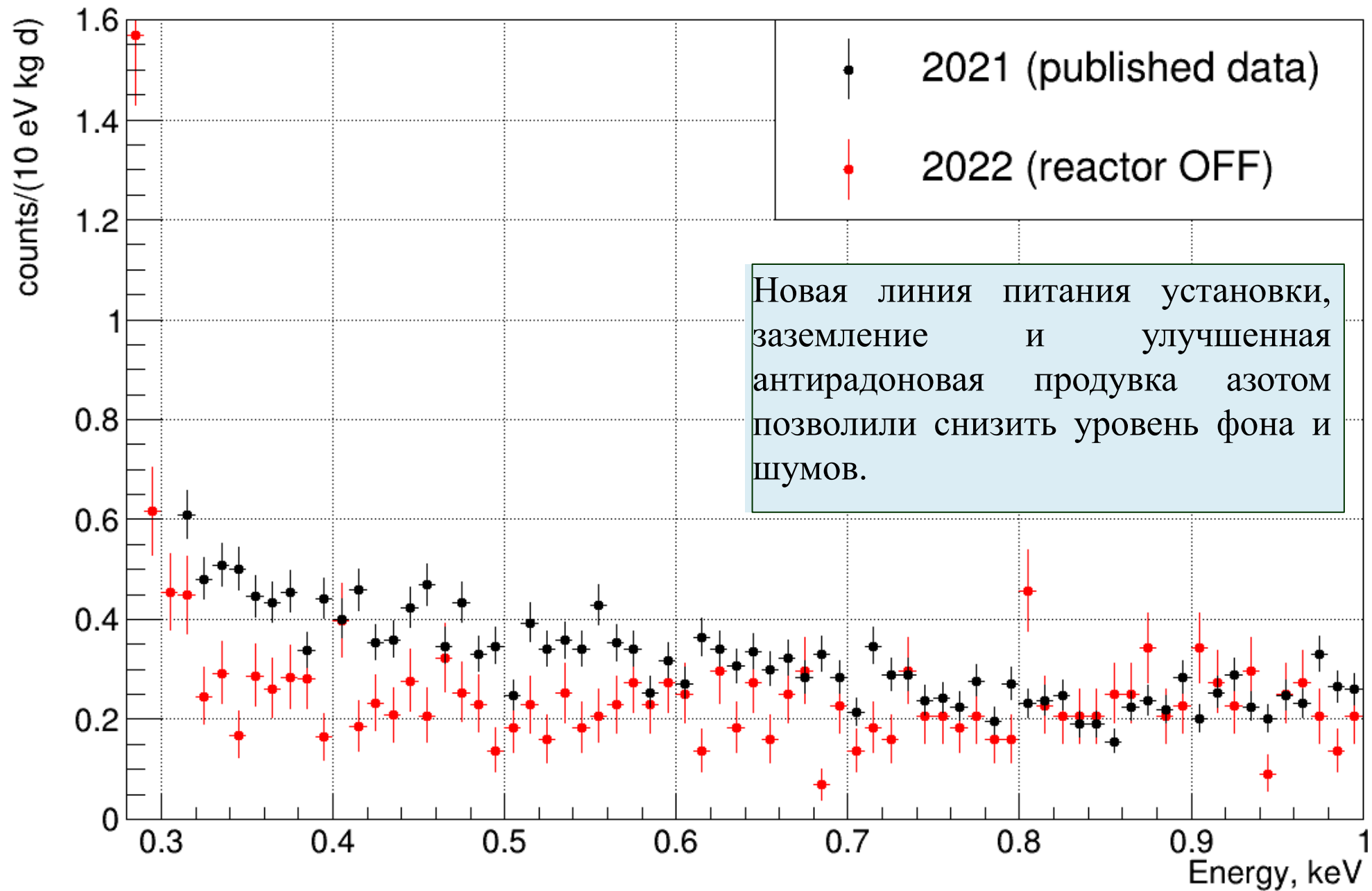
Опубликованная статья

I. Alekseev et al. Phys. Rev. D 106,L051101

<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.106.L051101>

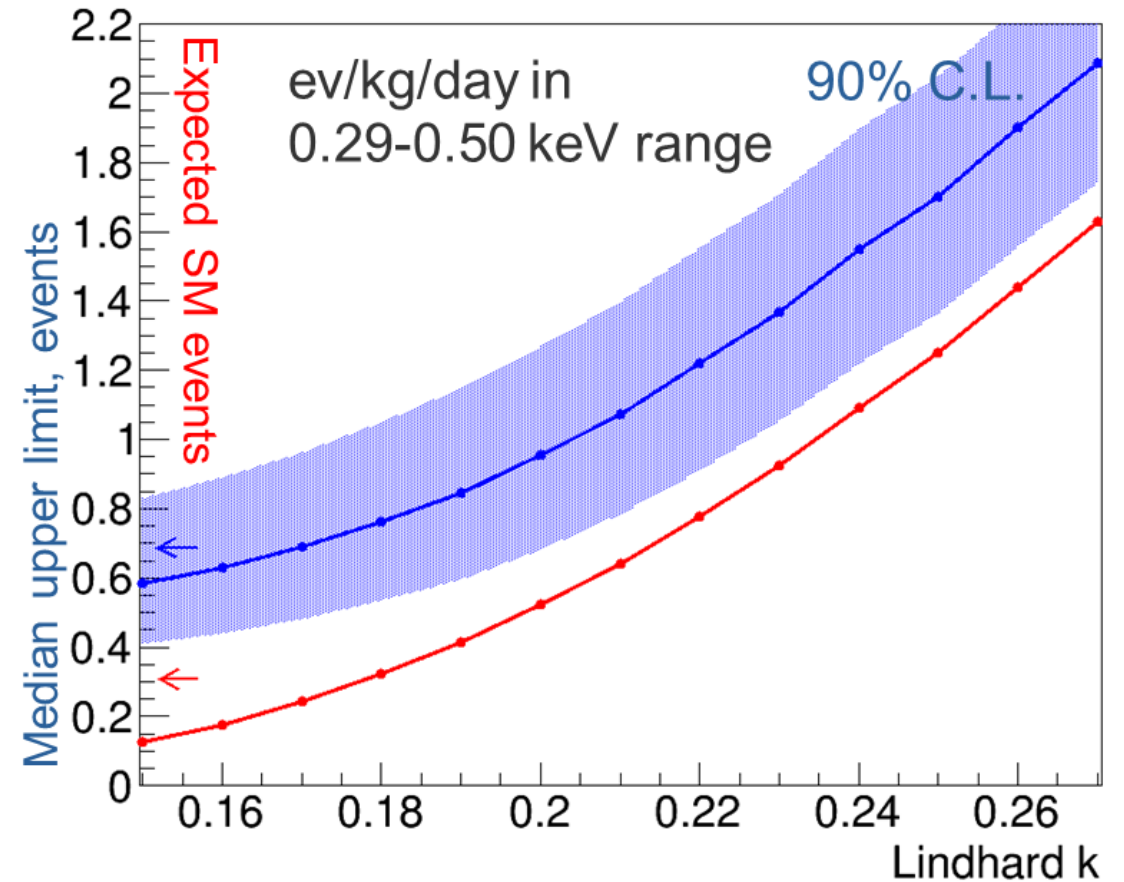
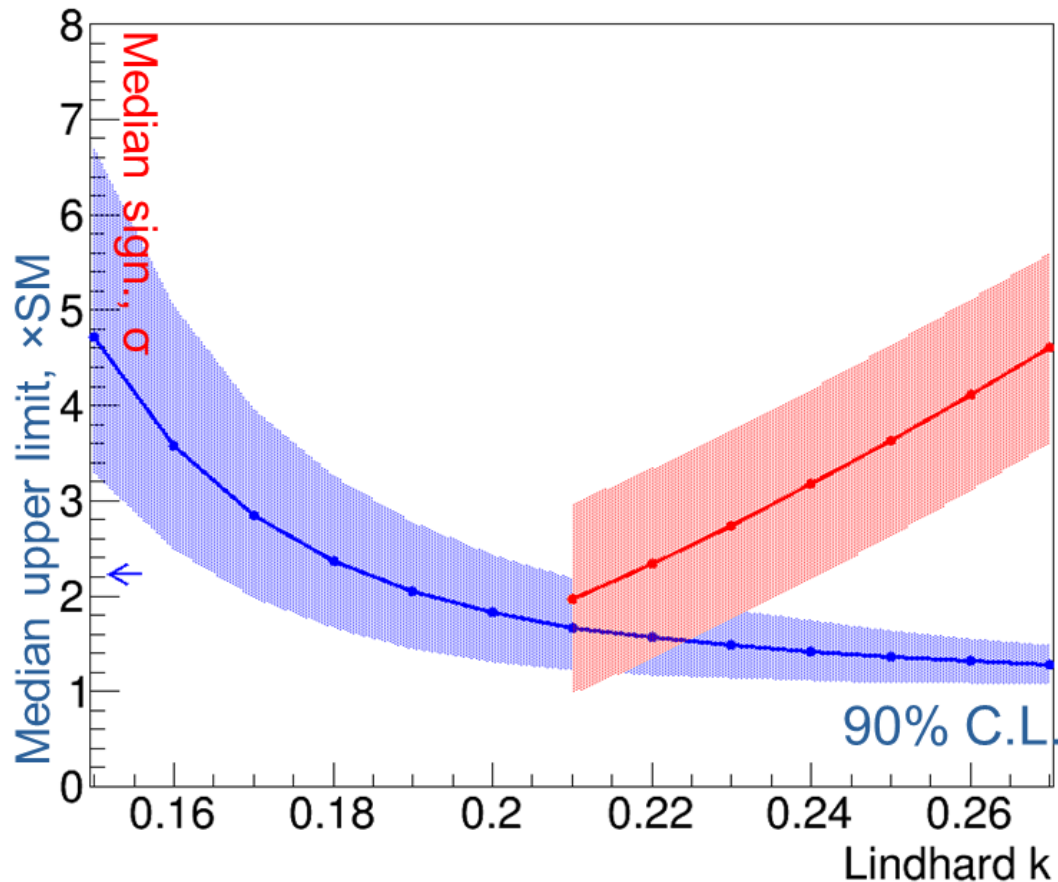


	Число событий (320-360 эВ)	Время измерений в днях	Событий на кг в день (только стат. ошибки)
Реактор вкл	251	94.5	2.32 ± 0.15
Реактор выкл	126	47.1	2.34 ± 0.21
Вкл-Выкл			-0.017 ± 0.255
УКРН, $k = 0.26$	55		0.46

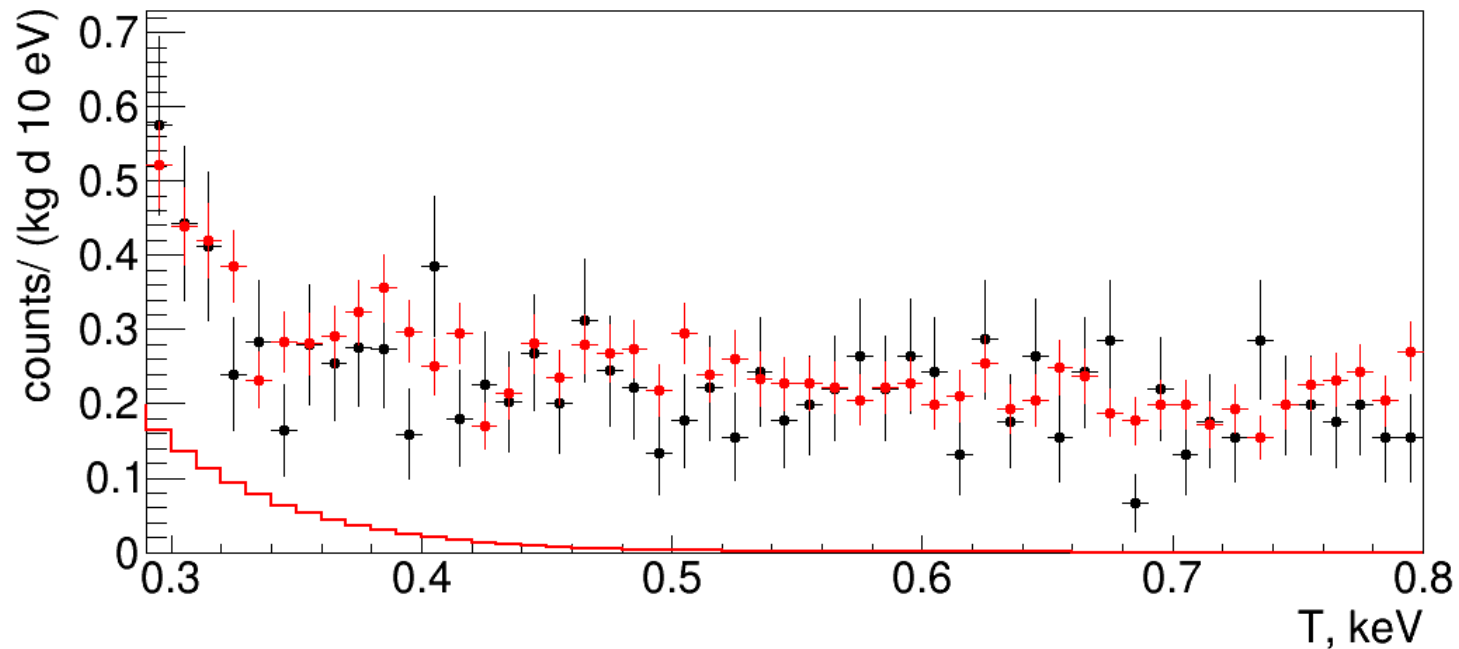


Чувствительность к УКРН в верхнем положении

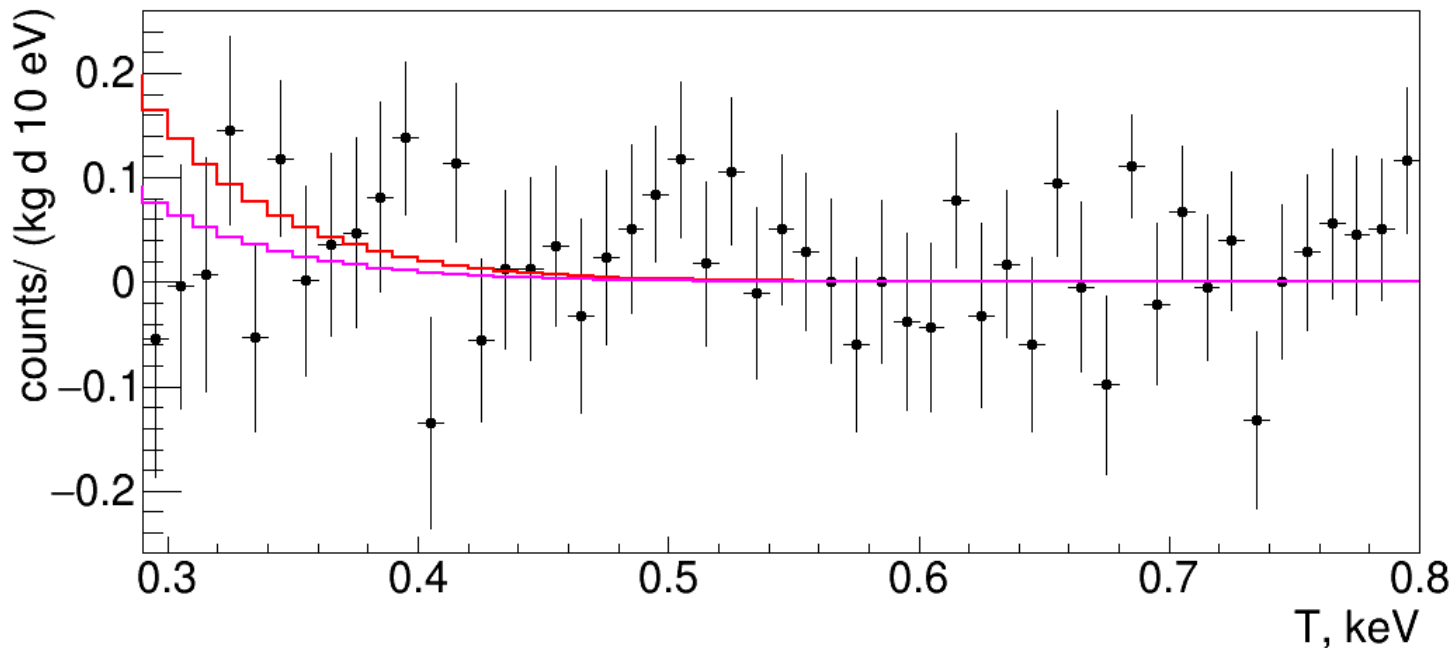
Предположения о чувствительности к УКРН получены из сравнения фонового спектра (55 кг дней) и сгенерированного спектра УКРН + фон (со статистикой эквивалентной 217 кг дней).



Предварительный анализ данных 2023 года



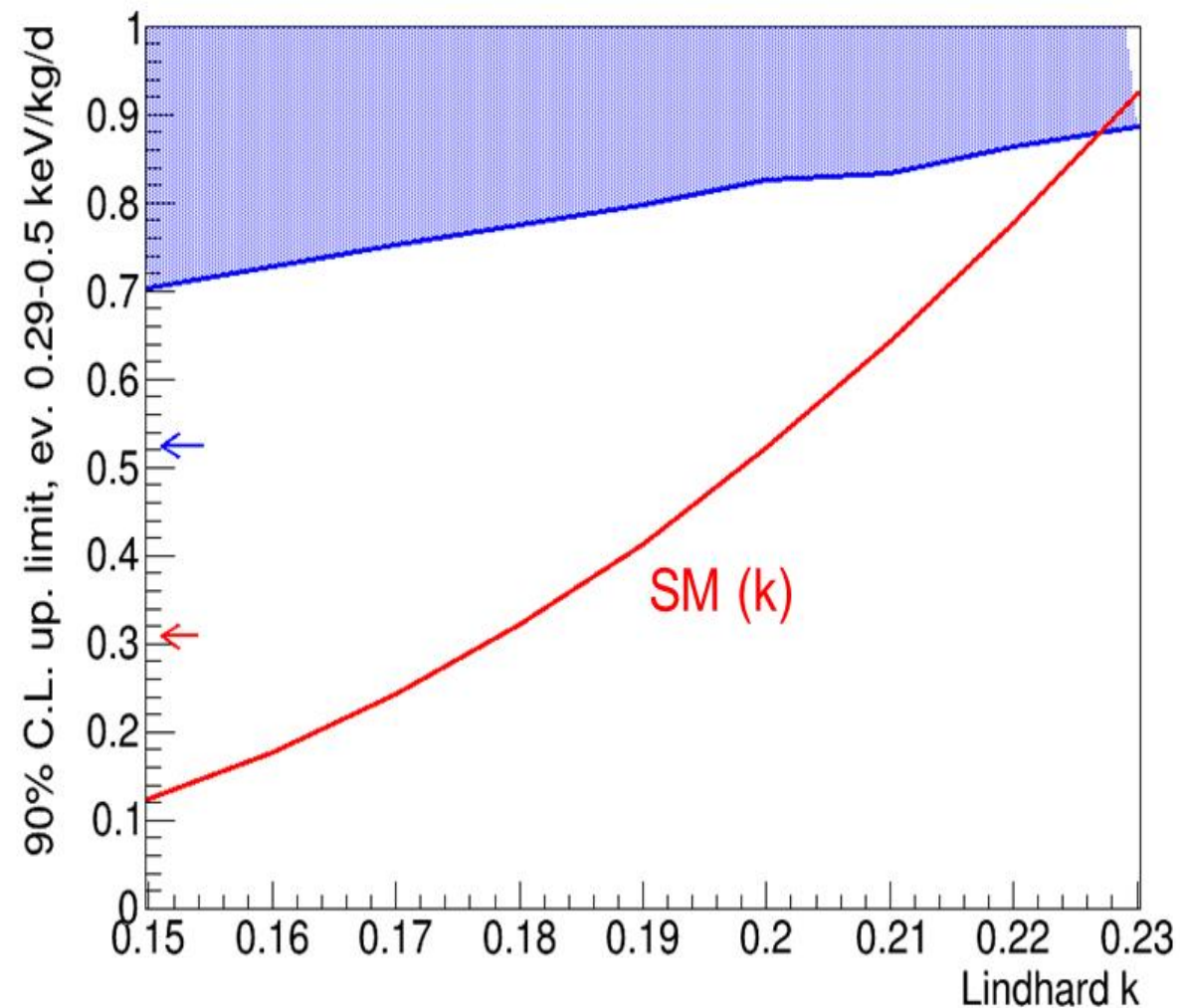
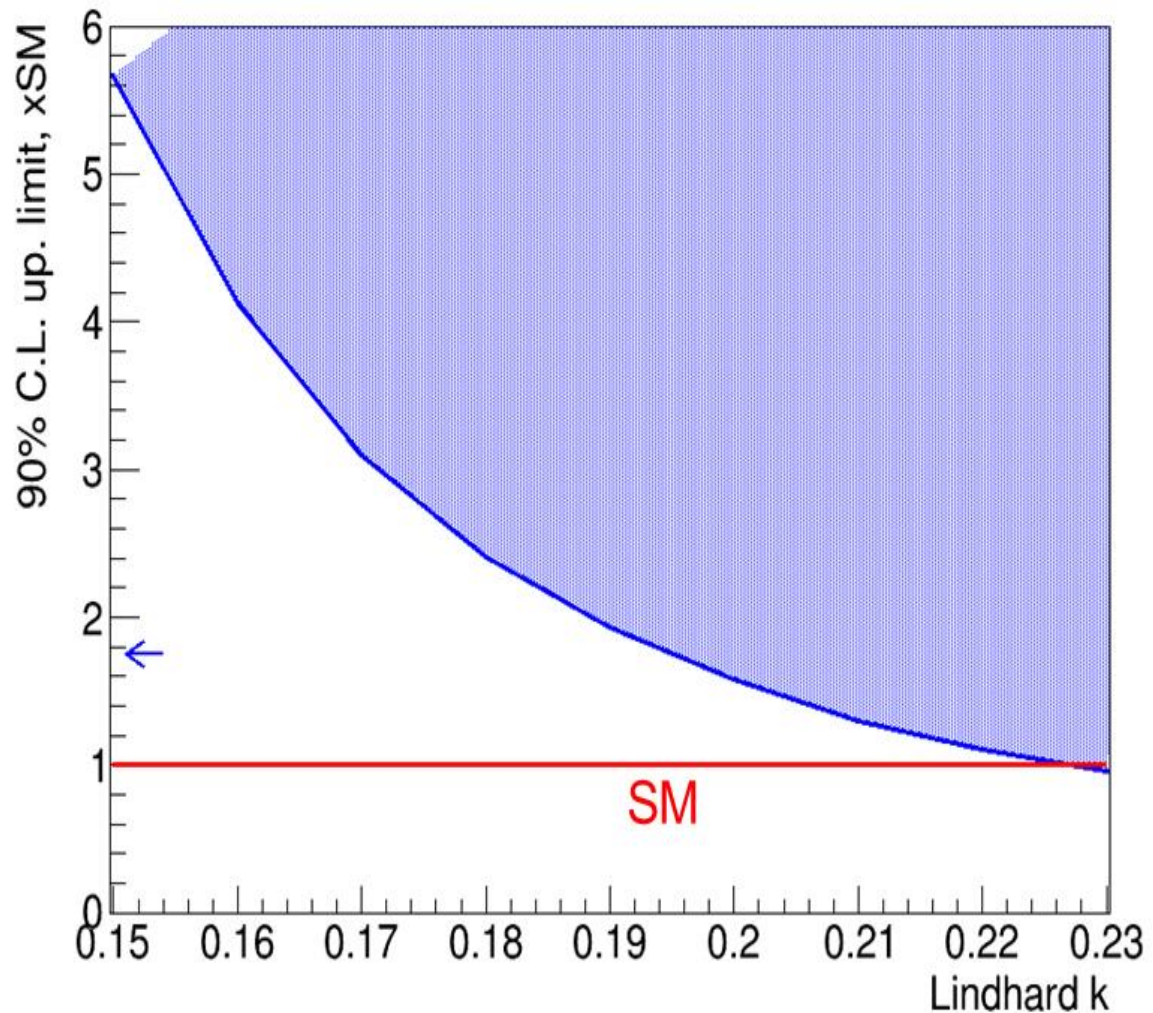
Существенных различий низкоэнергетической части спектра при включенном реакторе (154 дней) от спектра при выключенном реакторе (39 дней) не обнаружено.



Красная линия— ожидаемый спектр УКРН.

Фиолетовая линия – наилучшее соответствие моделирования эксперименту («best fit»)

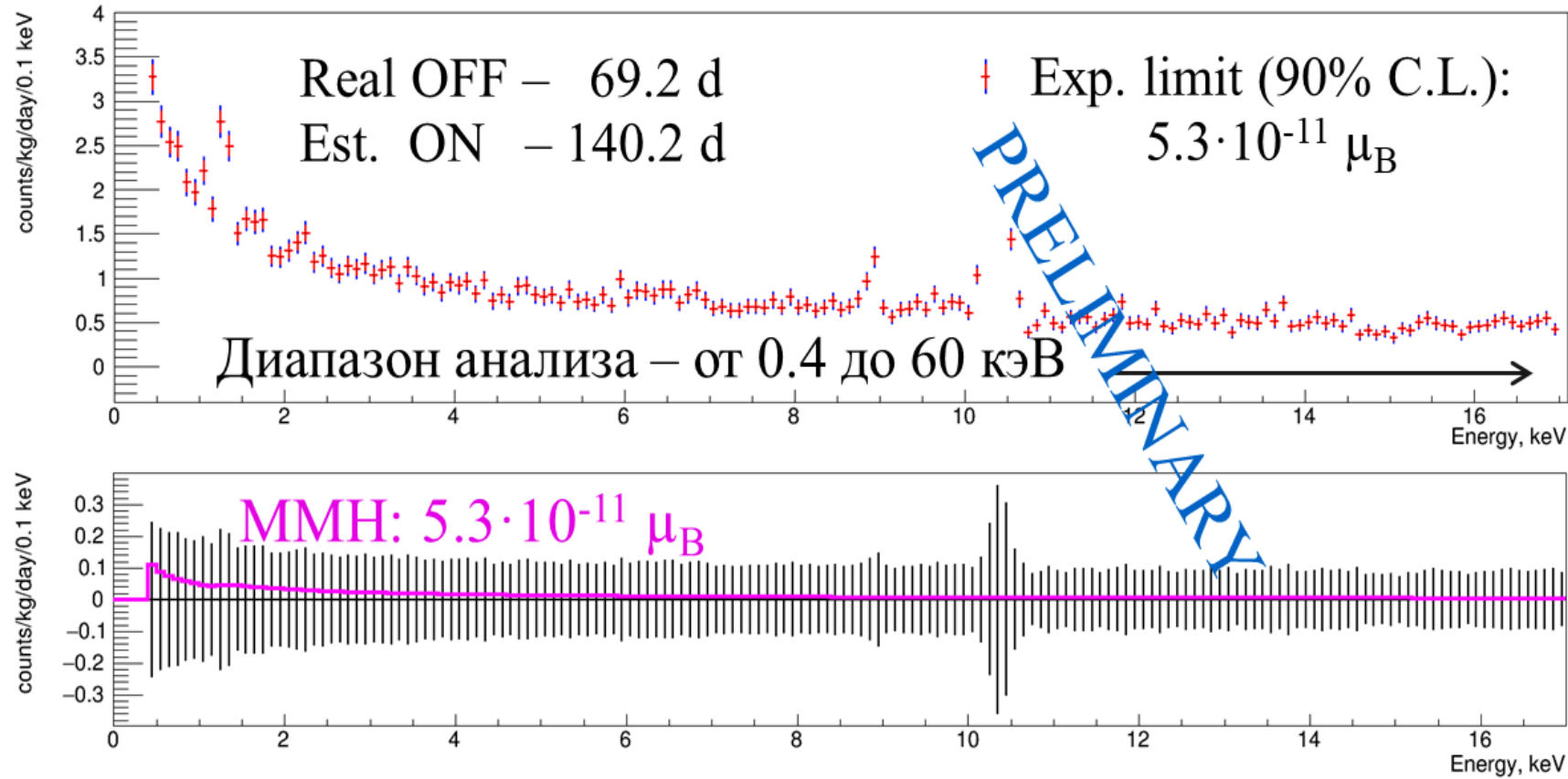
Предварительные пределы на параметр «квенчинга»



Получен верхний предел параметра «квенчинга» $k < 0,23$ с 90% CL.

Чувствительность к ММН

Оценки чувствительности с измеренным на КАЭС фоном (данные реактор
выкл)



Замена измеренного фона на
модель:

-> $4.0 \cdot 10^{-11} \mu_B$, $[2.8, 5.1] \cdot 10^{-11} \mu_B$

Увеличение стат. с включенным
реактором до 900 суток:

-> $2.5 \cdot 10^{-11} \mu_B$, $[1.8, 3.3] \cdot 10^{-11} \mu_B$

Чувствительность GEMMA:

$3.4 \cdot 10^{-11} \mu_B$, $[2.8, 4.1] \cdot 10^{-11} \mu_B$

Заключение

- Измерения со спектрометром νGeN продолжаются. На данном этапе набрано более 1200 кг дней статистики.
- В настоящее время проводится общий анализ данных, полученных в нижнем и верхнем положении спектрометра.
- Разрабатывается подход к учету систематических ошибок в анализе.
- Сигналов от УКРН пока не выявлено.
- Из анализа данных полученных в верхнем положении установлен верхний предел на параметр «квенчинга» $k < 0.23$.
- Продолжаются работы по улучшению установки. В частности установлены две пластины мюонного вето снизу подъемника. Разрабатывается новая система набора данных на основе «быстрых» АЦП. Ведутся работы по созданию внутренней вето системы.

Спасибо за внимание!



Сравнение мест для измерений

Эксперимент	Местоположение	Поток нейтрино [см ² в сек]	Защита от МЮОНОВ [М В. Э.]
νGEN	КАЭС, Россия	5×10^{13}	~50
CONUS	Брукдорф, Германия	$2,4 \times 10^{13}$	10-45
TEXONO	Куо-Sheng, Тайвань	$6,4 \times 10^{12}$	-
RED-100	КАЭС, Россия	$1,7 \times 10^{13}$	>50
CONNIE	Angra 2, Бразилия	$6,8 \times 10^{12}$	0
RICOCLET	ILL, Франция	2×10^{12}	~15
MINER	Texas A&M, США	2×10^{12}	~5
NUCLEUS	Chooz, Франция	2×10^{12}	~3
NCC-1701	Dresden-II, США	$4,8 \times 10^{13}$	-
NEON	Hanbit 6, Корея	$7,1 \times 10^{12}$	~8
SBS	Laguna Verde, Мексика	$3 \times 10^{12}?$?