



Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**«Детекторы нейтронов на основе неорганического
сцинтиллятора ZnS(Ag) с добавлением захватчика
нейтронов ${}^6\text{Li}$ или ${}^{10}\text{B}$ »**

**Д.М. Громушкин*, Е.П. Волков, А.Н. Дмитриева, А.Ю. Коновалова, Е.С. Моргунов,
А.А. Петрухин, Е.П. Хомчук, С.С. Хохлов, И.А. Шульженко**

17 - 21 февраля 2025 г.

Детекторы нейтронов

Детекторы нейтронов – это важный элемент прикладных и фундаментальных исследований.

Нейтроны почти не взаимодействуют с электронами, таким образом, нейтроны нельзя регистрировать обычными приборами, основанными на ионизирующей способности заряженных частиц. **Приходится использовать вторичные эффекты.**

Детектирование осуществляется с помощью **различного рода взаимодействий нейтронов с ядрами вещества** детектора, в результате которых образуются вторичные заряженные частицы с энергией, достаточной для регистрации их ионизационными методами.

Пропорциональные
нейтронные
счетчики

Сцинтилляционные
нейтронные
детекторы

Полупроводниковые
нейтронные
детекторы

Что приоритетно при выборе регистрации нейтронов?

- эффективность регистрации
- пространственное разрешение
- временное разрешение
- n/γ разделение
- площадь регистрации
- компактность
- низкая стоимость
- и другие

Для регистрации единичных нейтронов на уровне фоновых значений возможно использование сцинтиллятора ZnS с добавками захватчиков нейтронов.

Сцинтилляторы с добавками, чувствительными к тепловым нейтронам

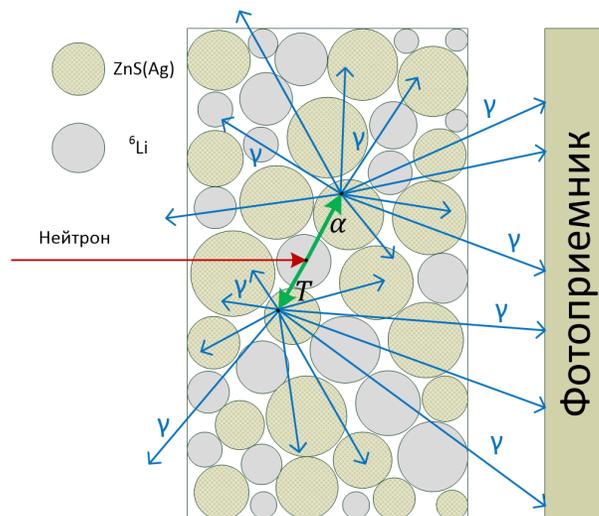
Сцинтилляторы

Сцинтиллятор	Добавка	Световыход на нейтрон, фотонов	$T_{\text{высв.}}$, нс
${}^6\text{Li-glass}$	Ce	~ 6000	75
${}^6\text{LiI}$	Eu	~ 50000	1400
${}^6\text{LiF/ZnS}$	Ag	~ 160000	200/10000
${}^6\text{LiBaF}_3$	Ce, K	~ 3500	1/34/2100
${}^6\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$	Ce	~ 40000	200/800
$\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6$	Ce	~ 70000	1000
$\text{B}_2\text{O}_3/\text{ZnS}$	Ag	~ 80000	200/10000

Основными производителями сцинтилляторов LiF/ZnS(Ag) являются фирмы Eljen technology, Saint-Gobain Crystals, Scintacor и SCIONIX.



Схема регистрации нейтрона сцинтиллятором на основе ${}^6\text{LiF/ZnS(Ag)}$.



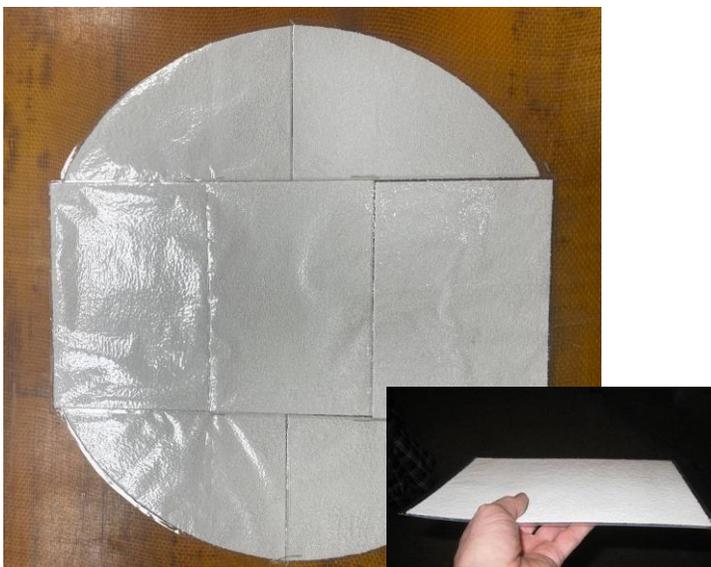
Сцинтиллятор	Массовое содержание $\text{ZnS:}{}^6\text{LiF}$	Толщина (мм)	Размер max (см ²)	Эффективность захвата, %
BC-702	4:1	6.35	R127 мм	50
BC-704	2:1	0.4	30*30	10
EJ-426	3:1/1:2	0.32/0.5	40*50	23/34
ND	-	-	30*30	~20

Подобные сцинтилляторы в РФ сегодня не поставляются. Высокая стоимость (цена за 1 экран 300x300 мм от 450 т. руб.)

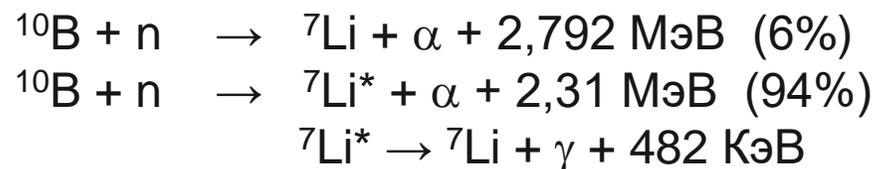
Сцинтилляторы с добавками, чувствительными к тепловым нейтронам российского производства

Сцинтиллятор производится в виде белого порошка, что позволяет создавать различные конструкционные исполнения регистрирующего слоя.

Сцинтиллятор **ZnS(Ag) с LiF**,
обогащение **до 90% изотопом ^6Li**
(светосостав СЛ6-5, АО "РНЦ
"Прикладная химия (ГИПХ)")



Сцинтиллятор **ZnS(Ag) с B_2O_3** ,
природный бор с **19.8% изотоп ^{10}B**
(ЛРБ-2, ЗАО "НПФ Люминофор")



Возможность **режекции сигналов** от регистрации нейтронов.

Высокая **эффективность регистрации**.

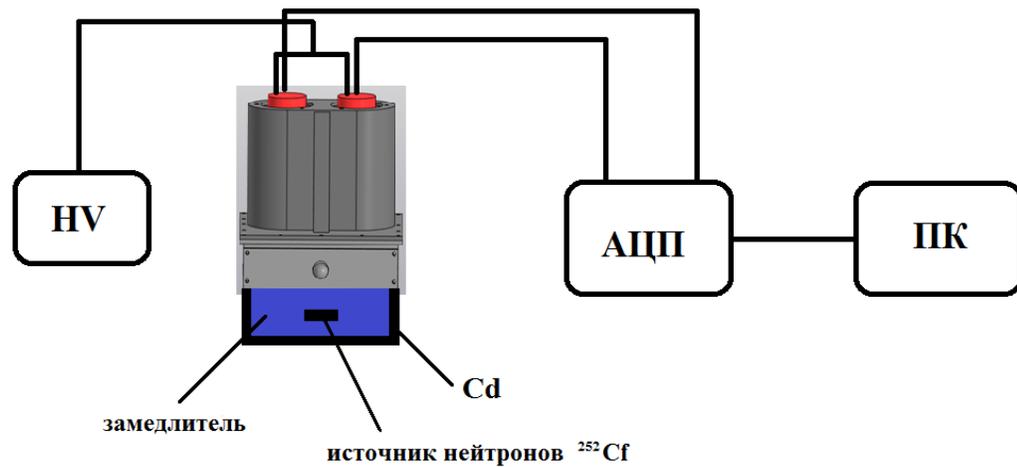
Возможность создания **больших детекторов**.

Низкая чувствительность к **гамма излучению**.

Высокая **помехоустойчивость**.

Эффективность регистрации тепловых нейтронов ~ **10-20%**

Сравнение сцинтилляторов с добавками, чувствительными к тепловым нейтронам



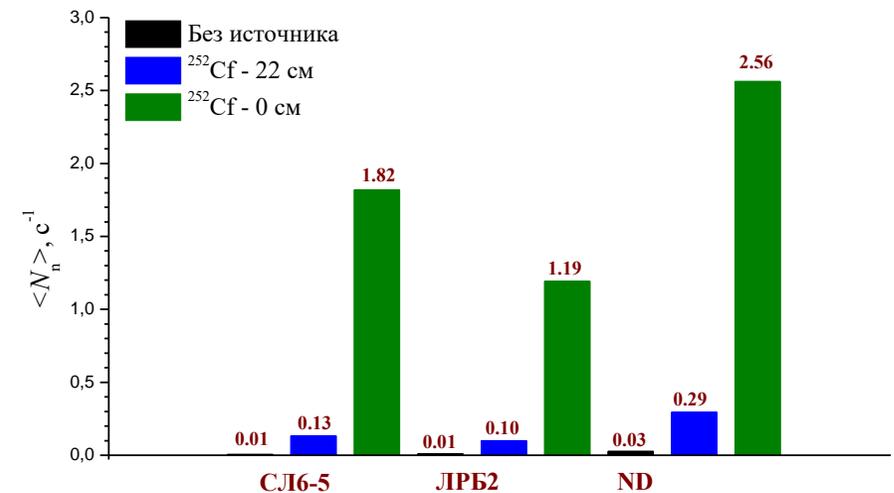
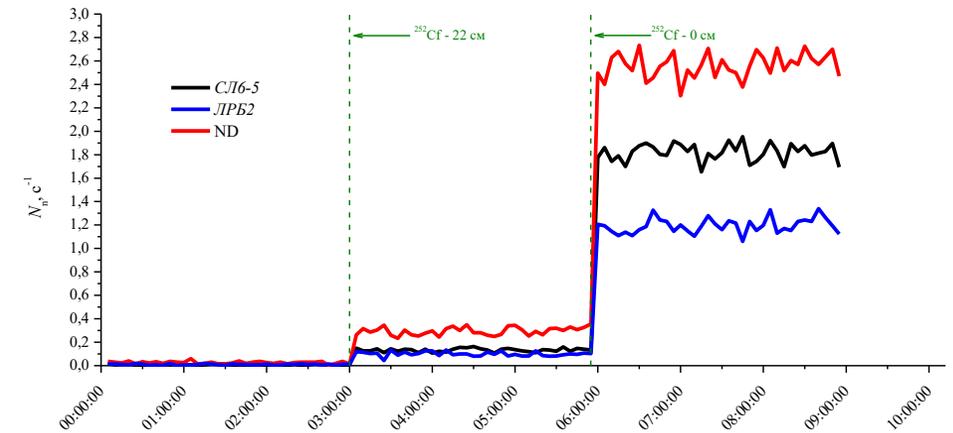
Образец СЛ6-5 на основе сцинтилляционной композиции LiF/ZnS:Ag (Россия)

Образец ЛРБ2 на основе сцинтилляционной композиции ЛРБ2 $\text{B}_2\text{O}_3/\text{ZnS(Ag)}$ (ЗАО НПФ Люминофор, Россия)

Образец ND промышленный сцинтилляционный экран LiF/ZnS:Ag (Scintacor, Великобритания)

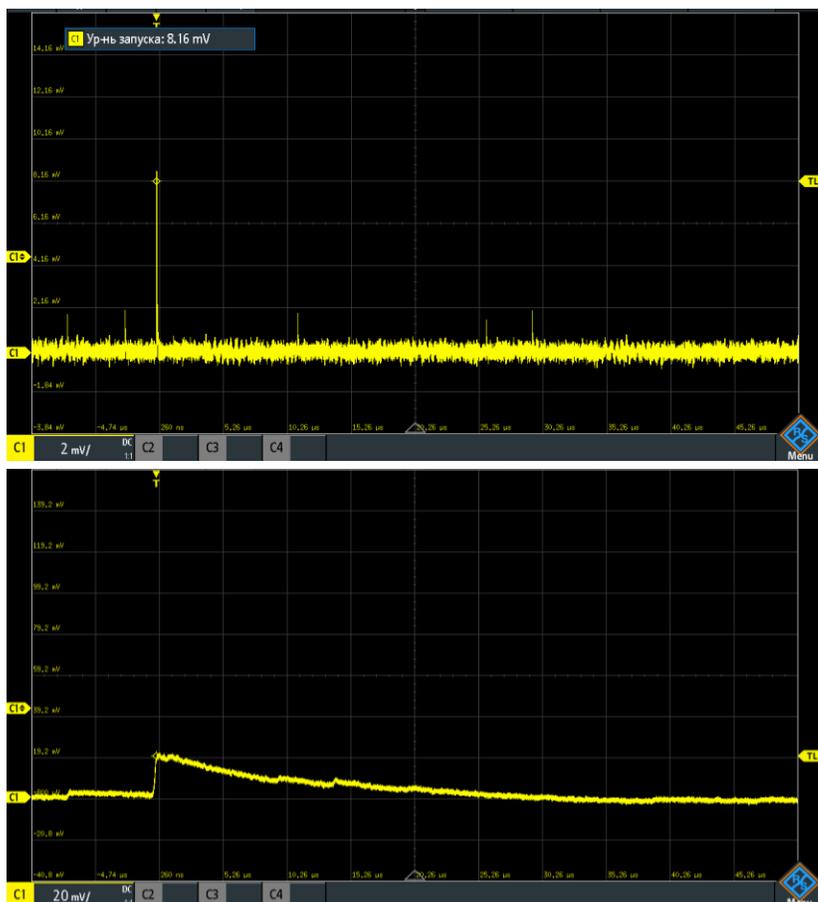


Результаты измерений

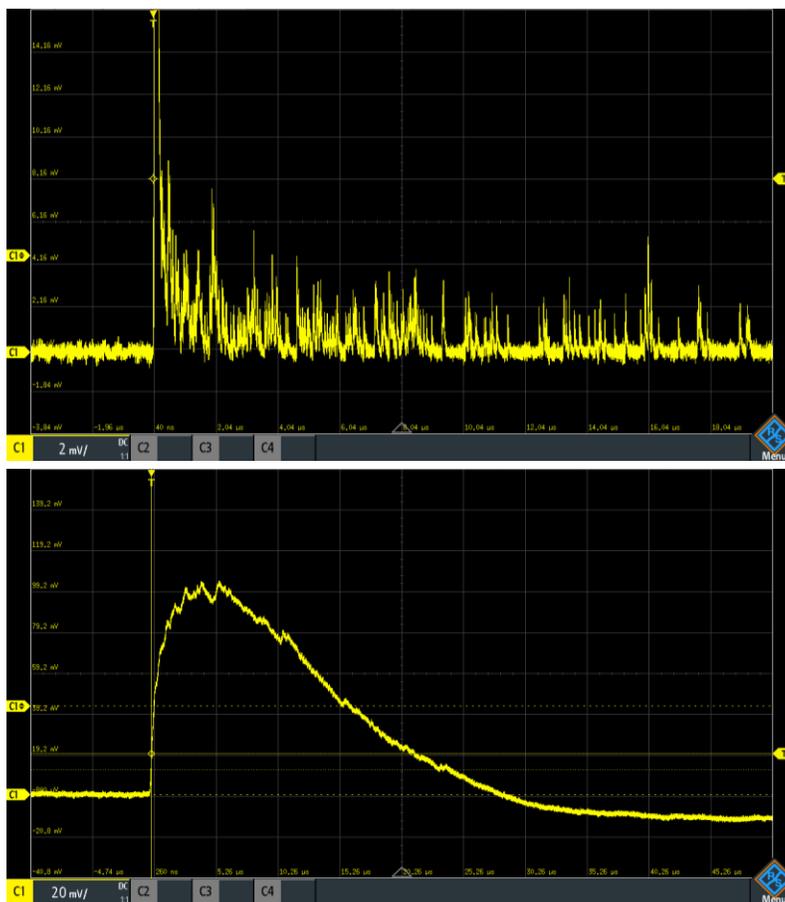


Характерные сигналы от сцинтиллятора

Регистрация заряженных частиц



Регистрация нейтрона

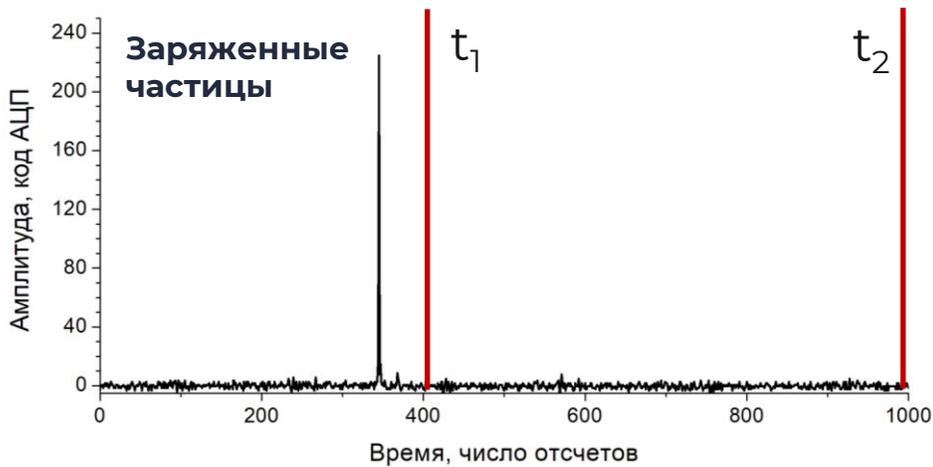
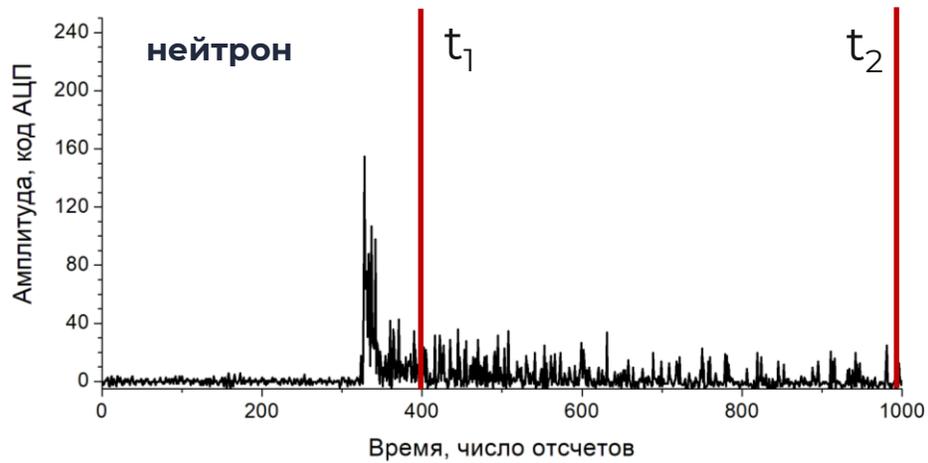


**За счет долгого времени
высвечивания возможна
режекция сигналов**

PSD (pulse shape discrimination) - это фундаментальное свойство некоторых сцинтилляторов, которое позволяет разделять сигналы на основе плотности ионизации различных типов излучения.

Разделение “прямых” сигналов

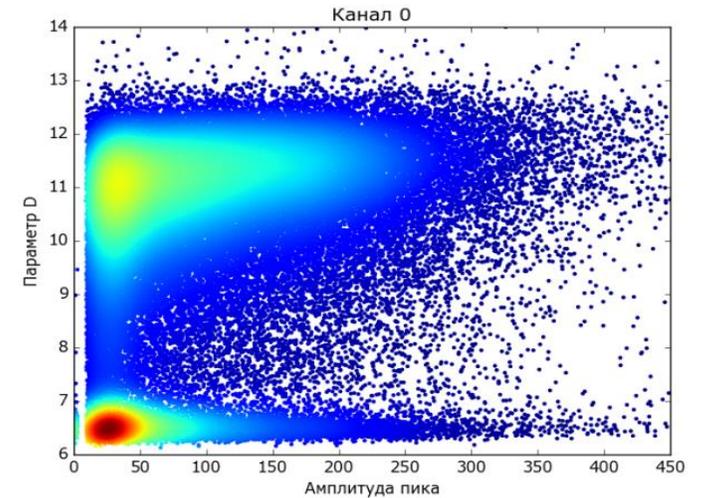
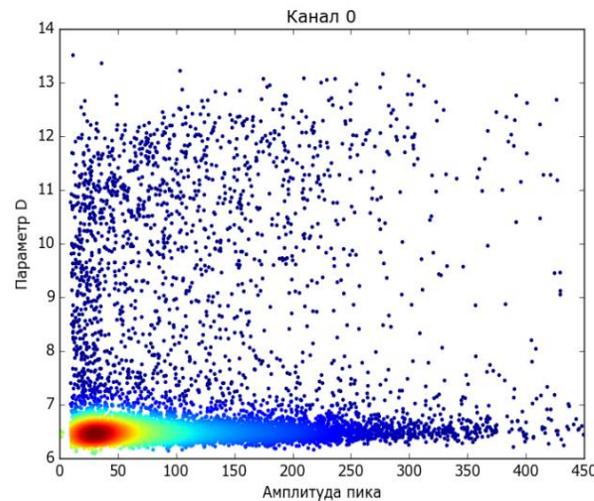
Примеры осциллограмм сигналов



Для разделения сигналов n/γ ,е можно использовать параметр D:

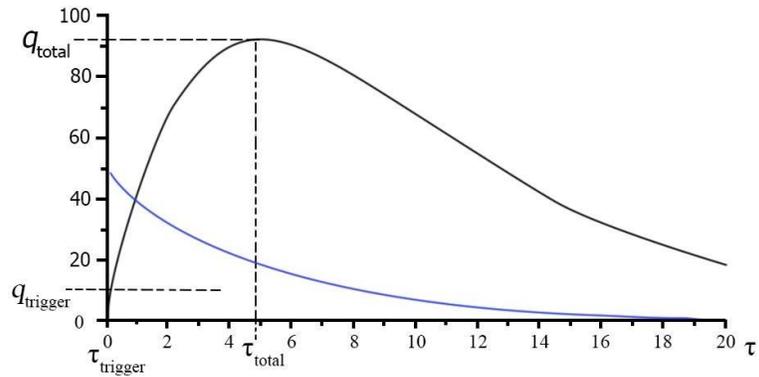
$$D = \ln \left(\sum_{n=t_{tail_1}}^{t_{tail_2}} x_n^2 \right)$$

Physics of Atomic Nuclei, 2021, Vol. 84, No. 9,

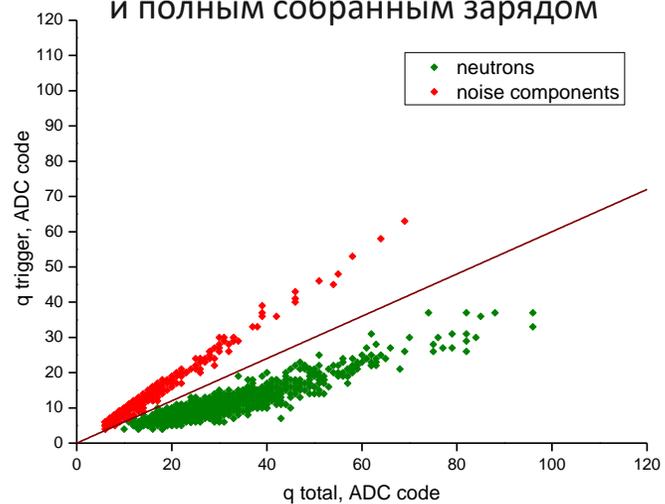


Разделение сигналов с аналоговым интегрированием

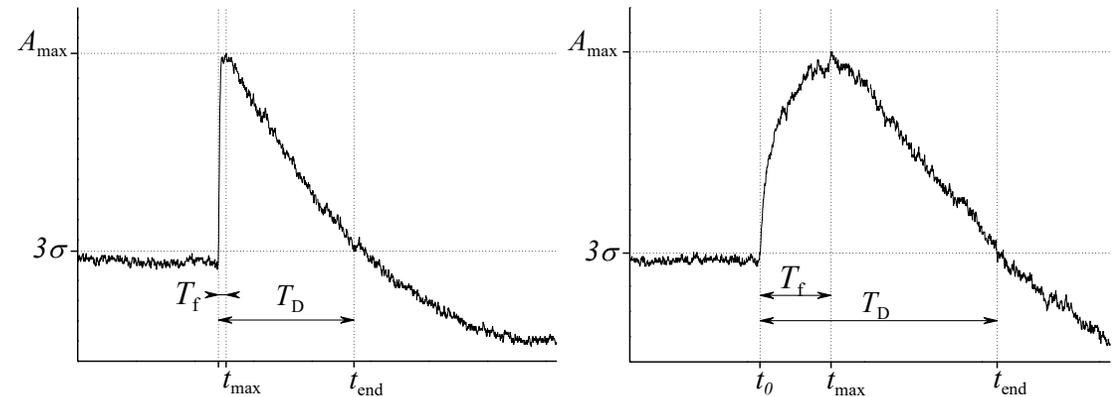
Пример сигналов установка «Нейтрон»



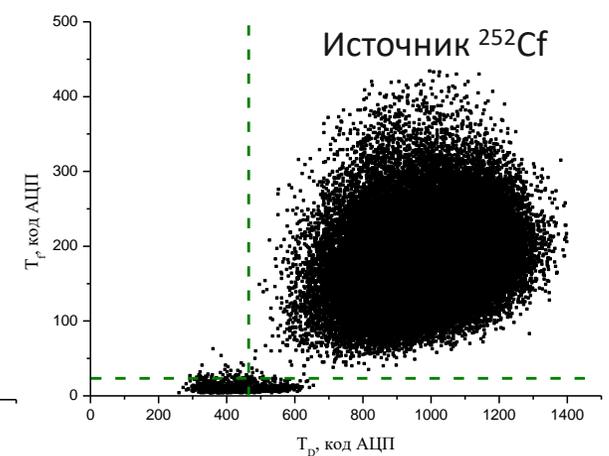
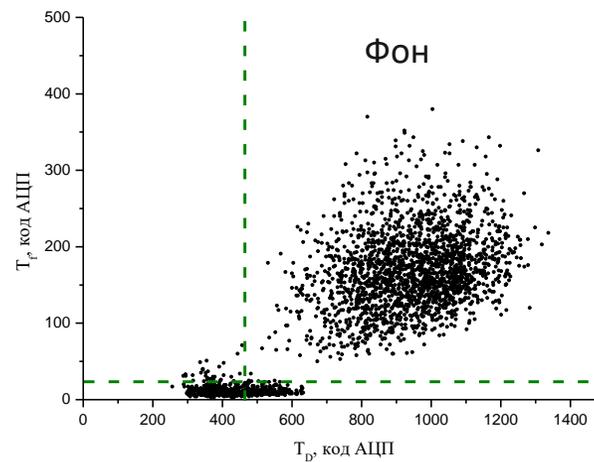
Зависимость заряда от «быстрой компоненты» и полным собранным зарядом



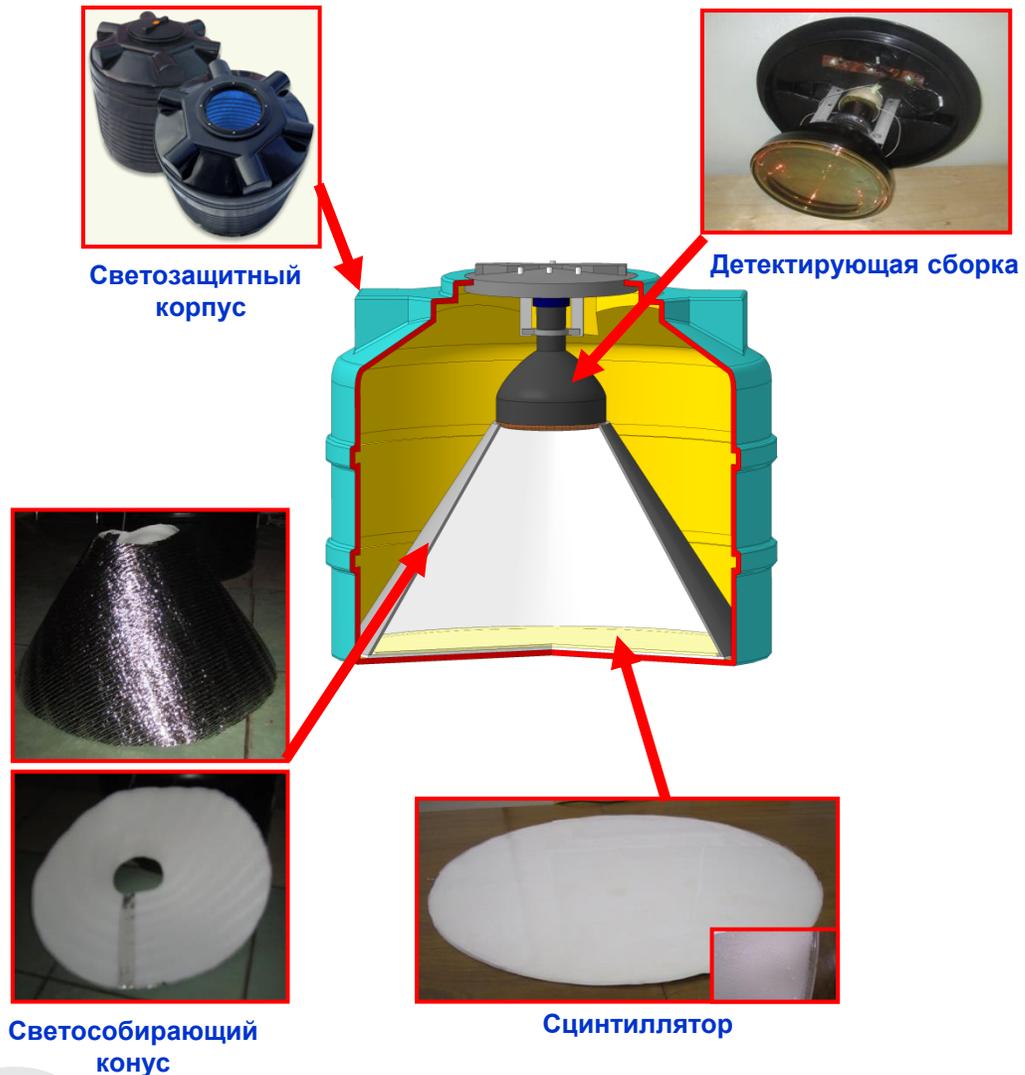
Пример сигналов установка ПРИЗМА-36



Зависимости времени нарастания фронта от длительности сигналов



Детекторы и установки для регистрации ШАЛ и исследования вариаций нейтронного фона



На основе подобных детекторов созданы установки:

«Нейтрон»	(НИЯУ МИФИ, ИЯИ РАН)	2010-н.в.
ПРИЗМА-32	(НИЯУ МИФИ, ИЯИ РАН)	2012-2023
УРАН	(НИЯУ МИФИ)	2014-н.в.
ENDA-LHAASO	(ИЯИ РАН)	2020-н.в.
ENDA_INR	(ИЯИ РАН)	2020-н.в.
ПРИЗМА-36	(НИЯУ МИФИ)	2024-н.в.

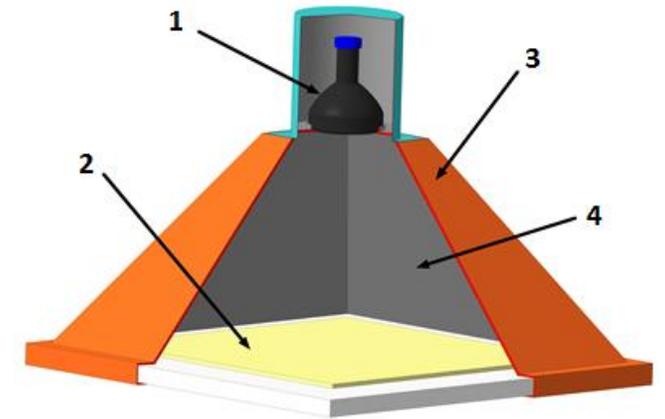
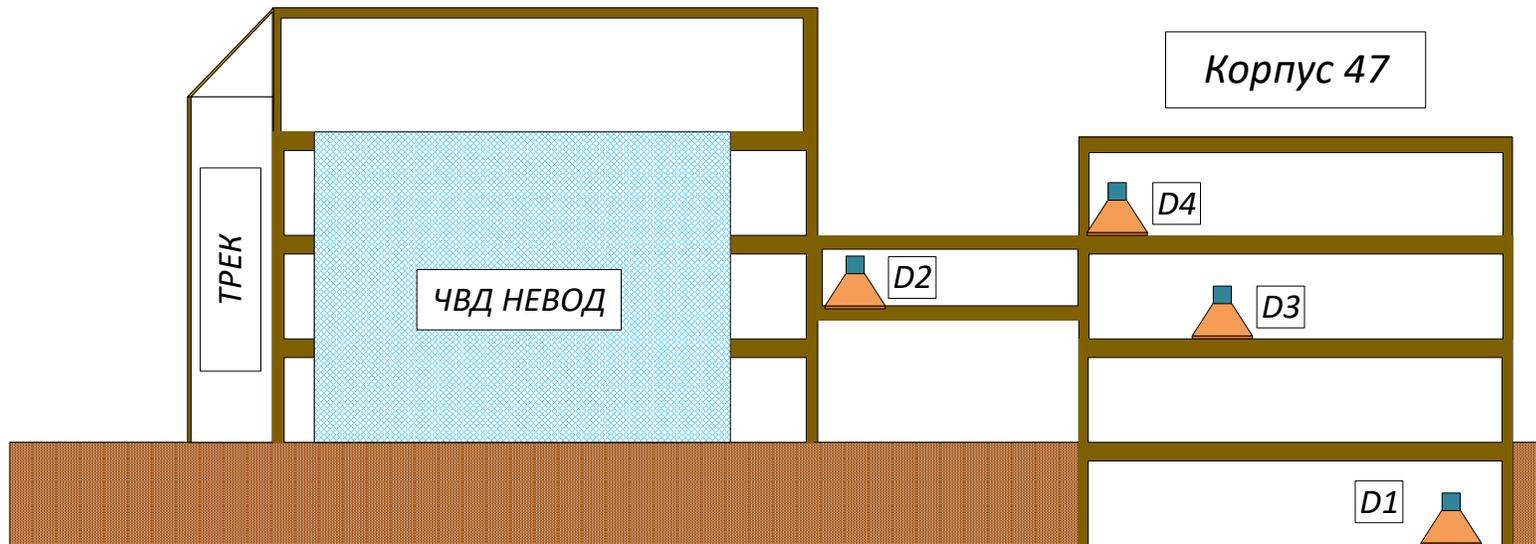
Установки предназначены для:

- Исследования нейтронов в ШАЛ
- Исследования вариаций нейтронного фона
- Контроль нейтронного фона

Установка «Нейтрон»

- 4 детектора
- Сцинтиллятор ZnS(Ag)+⁶LiF
- Эффективная площадь 0.75 м²
- Расположение на разных уровнях

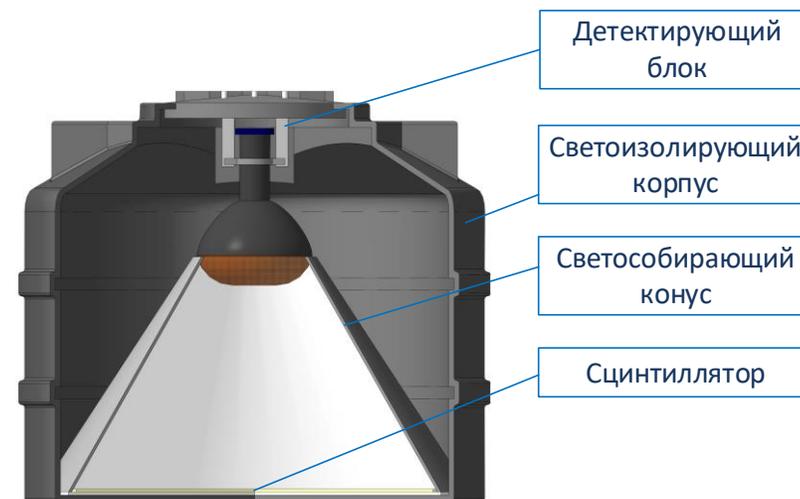
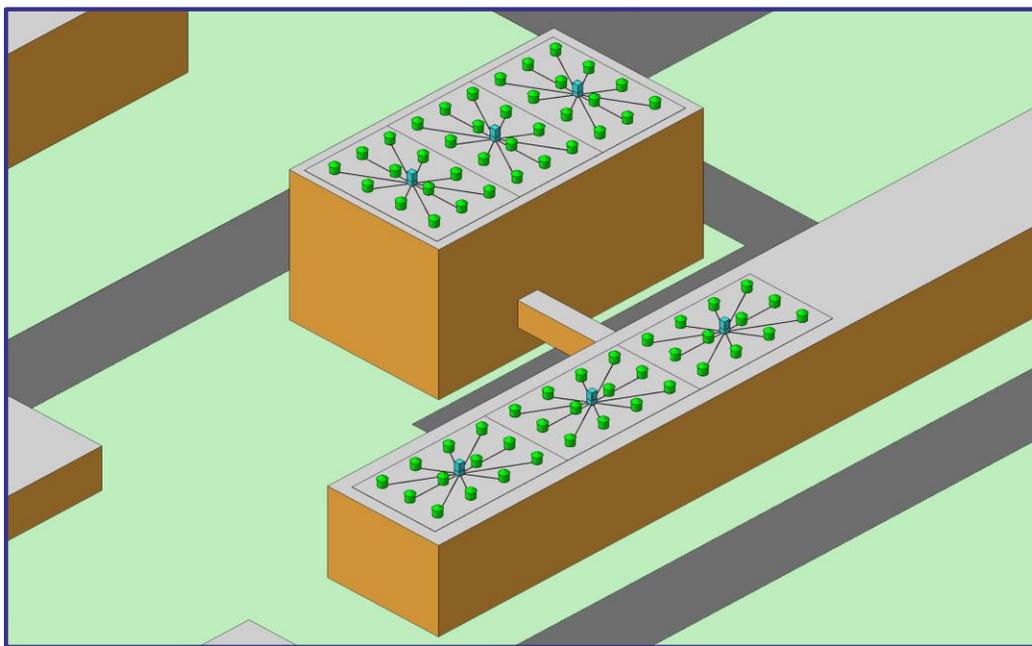
- ФЭУ-200 с плоским фотокатодом
- Делитель + Дискриминатор-Интегратор (5 мкс)-Усилитель (12d)
- Триггер от дискриминатора



- 1 - ФЭУ-200
- 2 - сцинтиллятор ZnS(Ag) + ⁶LiF
- 3 - светозащитный корпус
- 4 - светоотражающее покрытие.

**Исследования вариаций
нейтронного фона под разной
толщиной поглотителя
Контроль нейтронного фона**

Установка УРАН



- Шесть кластеров по 12 детекторов
- Сцинтиллятор $ZnS(Ag) + B_2O_3$
- Конфигурация 4 м x 5 м
- ФЭУ-200
- Внутренний триггер
- Делитель с тремя встроенными ИУ
- Площадь установки 1000 м²
- Площадь регистрации 26 м²

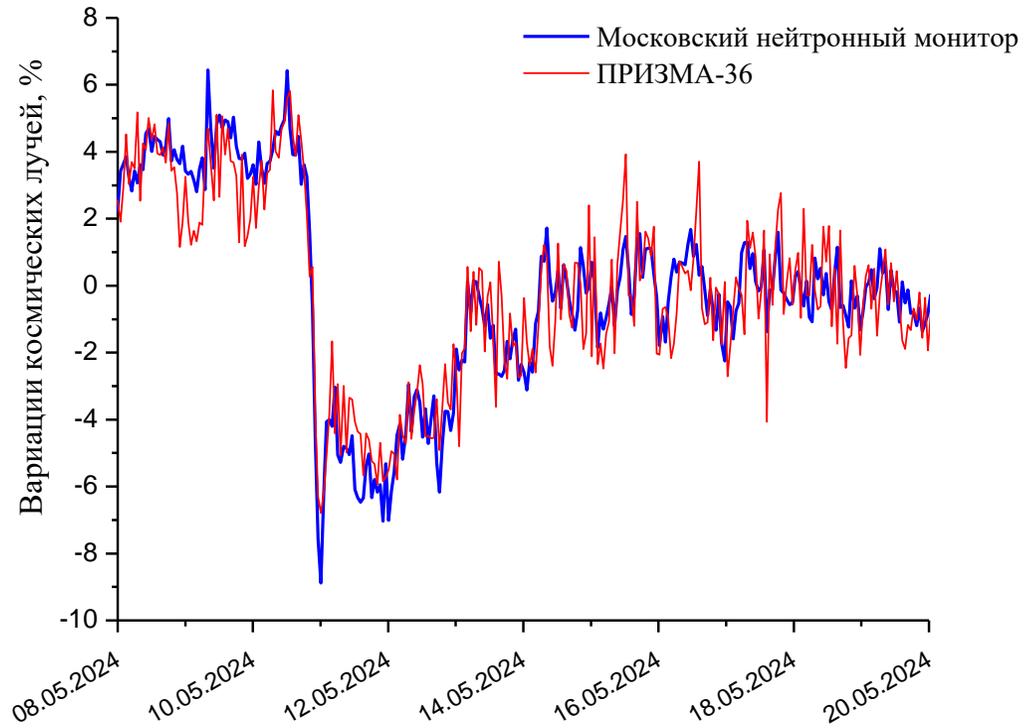


Исследования нейтронов в ШАЛ

Исследования вариаций нейтронного фона

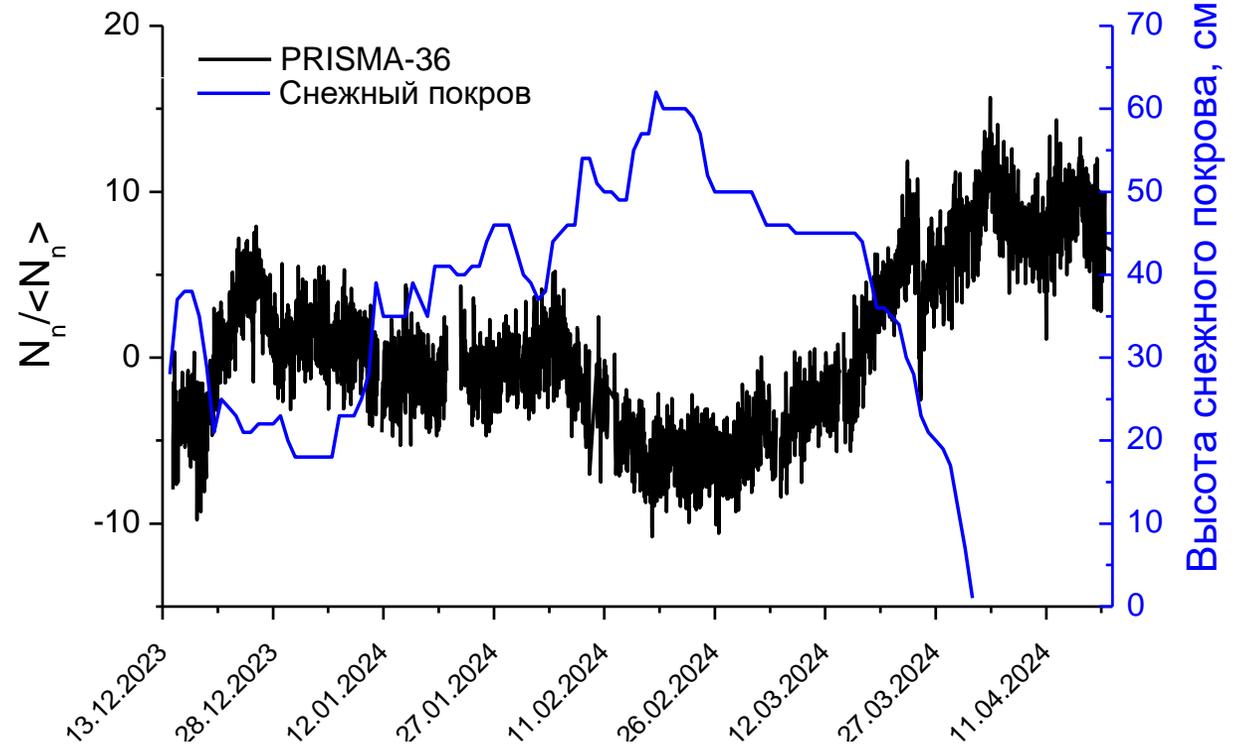
Вариации нейтронного фона

Регистрация форбуш-понижений



ПРИЗМА: $10.7 \pm 0.2\%$
МНМ: $11.1 \pm 0.1\%$

Влияние на фон нейтронов снежного покрова



Может достигать 15-20%

Заключение:

На основе неорганического сцинтиллятора ZnS(Ag) с добавлением захватчика нейтронов ${}^6\text{Li}$ или ${}^{10}\text{B}$ возможно создание высокочувствительных детекторов тепловых нейтронов.

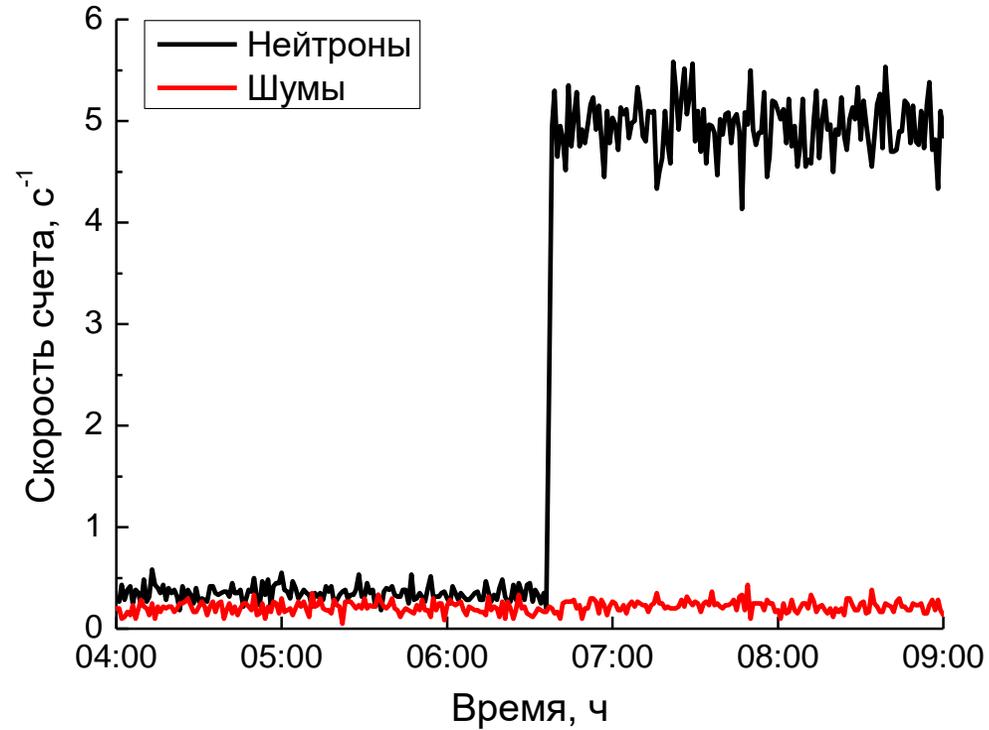
Отличительной особенностью подобных детекторов является:

- возможность отбора сигналов вызванных захватом нейтронов
- слабая чувствительность к заряженным частицам и гамма квантам
- возможность создания детекторов различной конструкции и размеров

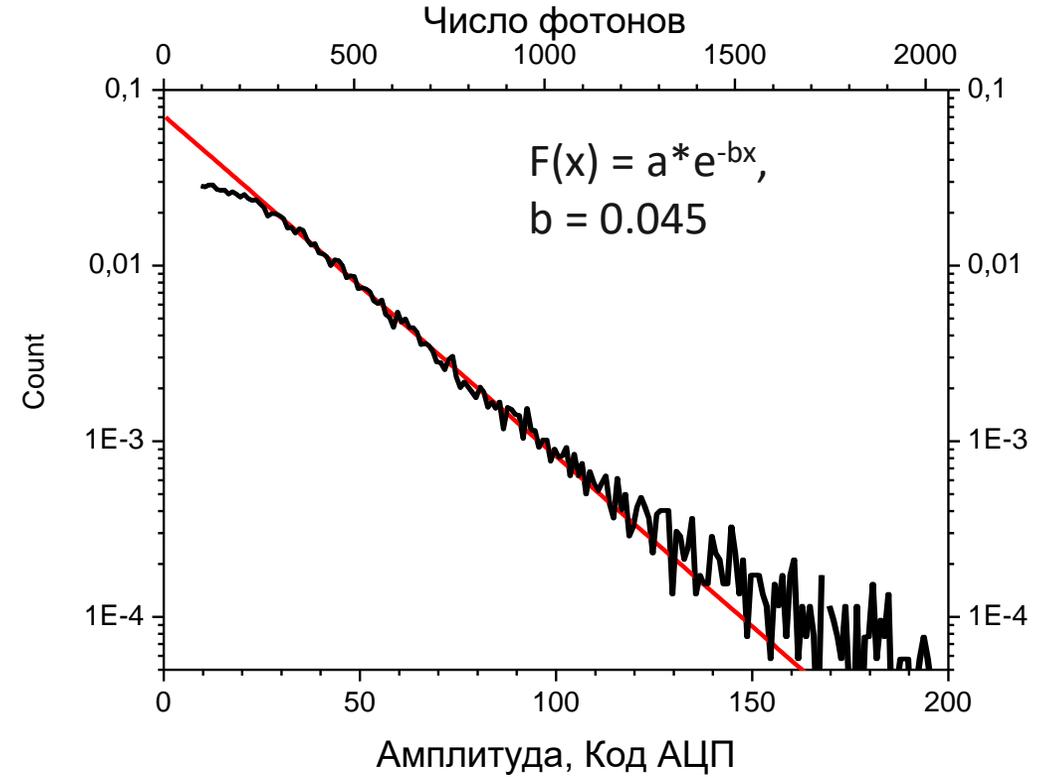
Длительная эксплуатация детекторов на основе подобных сцинтилляторов показывает высокую стабильность и надежность экспериментальных данных

Спасибо за внимание

Тестирование детектора с источником нейтронного излучения



Оценка эффективности регистрации нейтронов



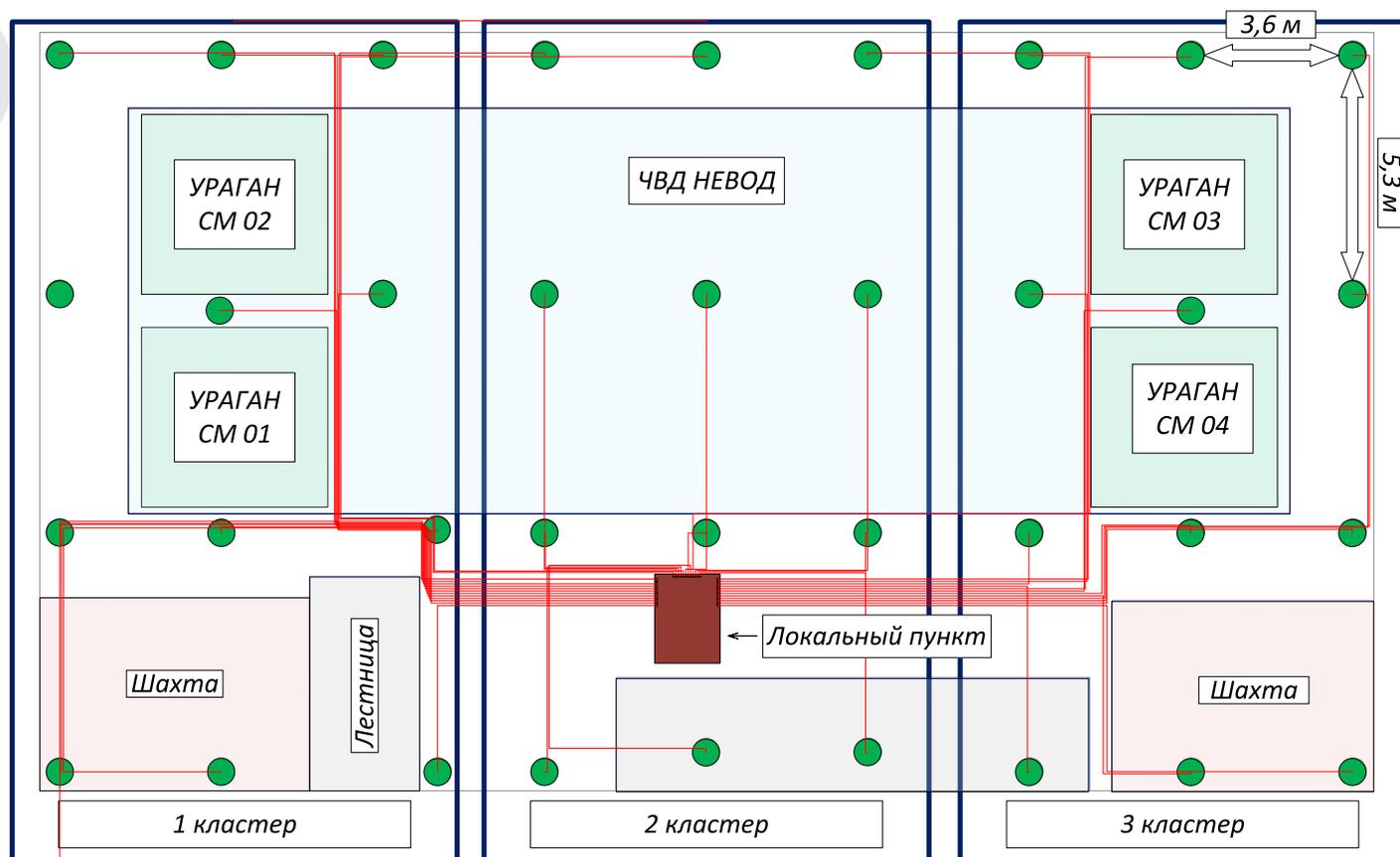
Порог отбора нейтронов ~ 100 фотонов.

Эффективность захвата тепловых нейтронов сцинтиллятором (СЛ6-5) ~ 20%, тогда эффективность регистрации детектора ~ 12%.

	$N_n, \text{с}^{-1}$	$N_{ch}, \text{с}^{-1}$
Фон	0.35	0,21
^{252}Cf	4.95	0,22

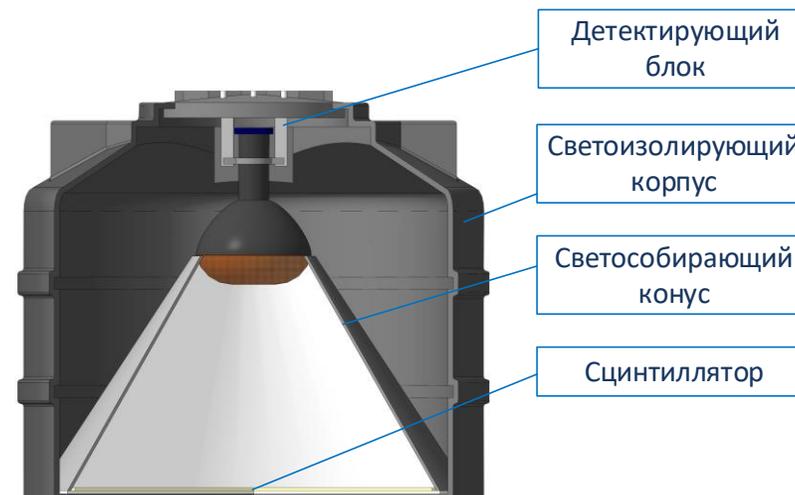
Установка ПРИЗМА-36

Работает с 2024 года



Исследования вариаций нейтронного фона
Исследования нейтронов в ШАЛ

Схема детектора установки ПРИЗМА -36



- Три кластера по 12 детекторов
- Сцинтиллятор $ZnS(Ag)+^6LiF$
- Конфигурация 3.6 м x 5.3 м
- ФЭУ ЕМІ 9350КА с полусферическим фотокатодом
- Внутренний триггер
- Делитель с тремя встроенными ИУ
- Площадь установки 500 м²
- Площадь регистрации 13 м²

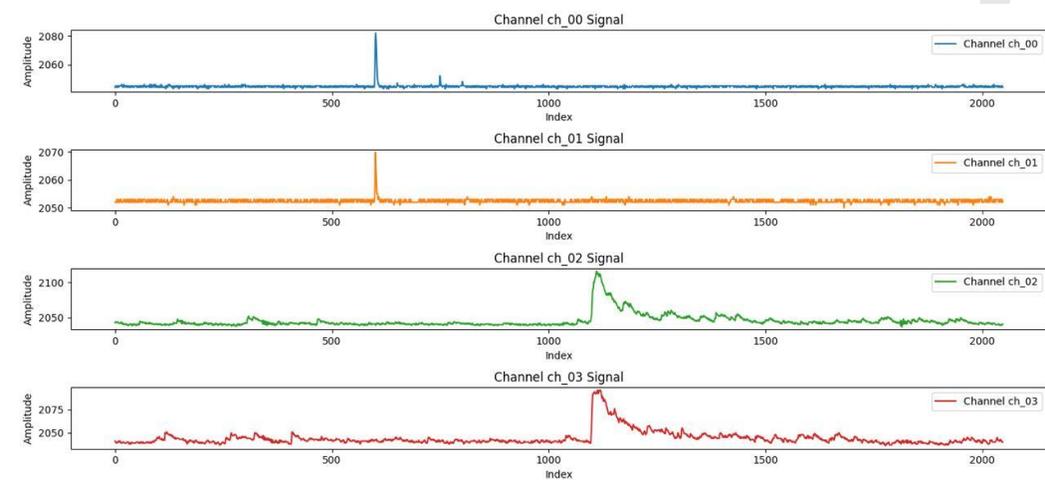
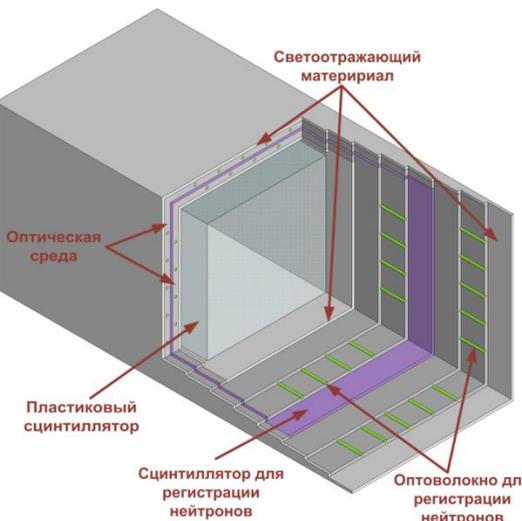
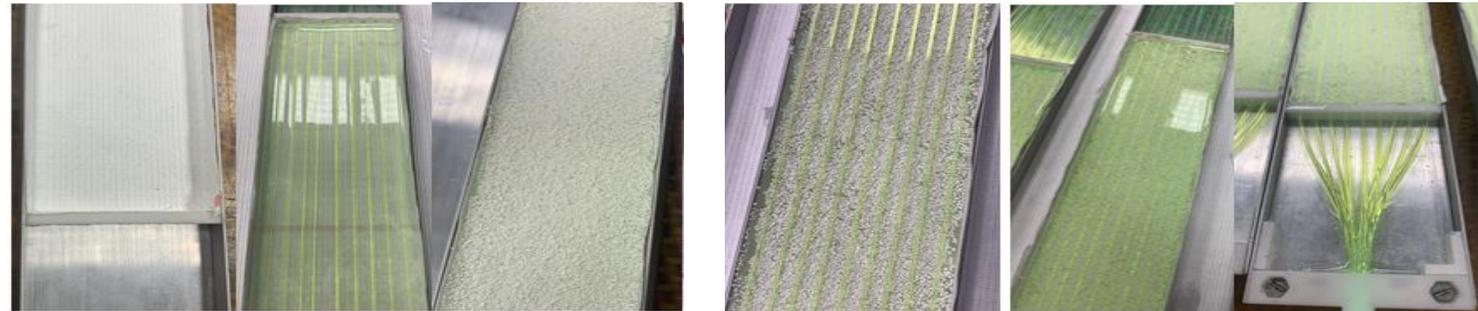


Прикладные разработки: регистрация нейтронов в нейтринном детекторе

Для регистрации реакторных антинейтрино, можно использовать реакцию их взаимодействия с протоном (обратный бета-распад): $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$

Позитрон за несколько наносекунд теряет свою энергию и аннигилирует в веществе детектора с излучением двух гамма-квантов с общей энергией 1.022 МэВ.

Нейтрон с энергией 5÷20 кэВ в течение ~10 мкс замедляется в веществе детектора, после чего может быть зарегистрирован.



**Спасибо
за
внимание**

