

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

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

УДК 539.1, 53.088.2

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
МЕДЕРНИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУРЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ
В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ REDOFFLINE

Студент _____ Ю. И. Коськин

Научный руководитель,
к.ф.-м.н., доц. _____ А. В. Кумпан

Научный консультант _____ О. Е. Разуваева

Москва 2025

Содержание

1	Введение	2
1.1	Упругое когерентное рассеяние нейтрино на атомных ядрах	2
1.2	Эксперимент CENNS-10	3
2	Формат данных эксперимента CENNS-10 и их чтение	4
3	SPE-калибровка фотоумножителей детектора CENNS-10	6
3.1	Задачи калибровки и принцип работы ФЭУ	6
3.2	Методика анализа и оценка величины SPE-сигнала	8
3.3	Обработка данных LED-ранов	9
4	Заключение	11
	Список использованных источников	12

1 Введение

1.1 Упругое когерентное рассеяние нейтрино на атомных ядрах

Упругое когерентное рассеяние нейтрино (УКРН) на атомном ядре — процесс, предсказанный в рамках Стандартной Модели [1]. УКРН играет важную роль в процессах формирования Вселенной и эволюции звезд [2], а также может быть ключевым в изучении физики за пределами Стандартной Модели. Отличительной чертой процесса является то, что нейтрино вступает во взаимодействие со всеми нуклонами ядра когерентным образом, что приводит к увеличению сечения взаимодействия примерно в N^2 раз, где N — число нейтронов в ядре. Этот процесс представляет собой обмен Z -бозоном между нейтрино и всеми нуклонами ядра одновременно, его схема представлена на рисунке 1.

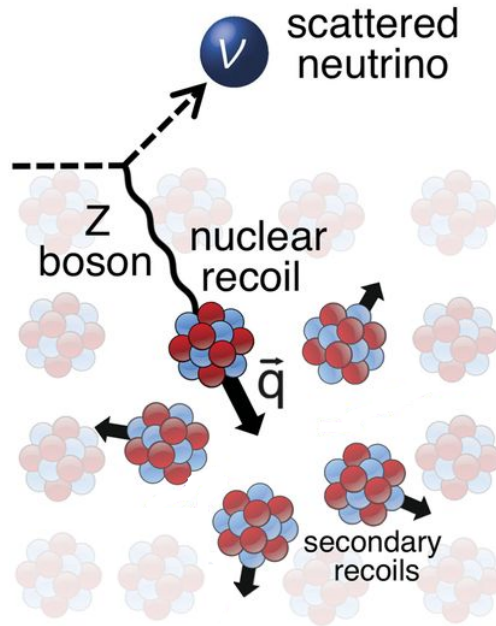


Рис. 1: Процесс УКРН: нейтрино взаимодействует с ансамблем нуклонов ядра путем обмена Z -бозоном, при этом атомное ядро приобретает импульс q .

Отметим, максимальная энергия ядра отдачи равна

$$T_{max} = \frac{2E_\nu^2}{M + 2E_\nu}, \quad (1)$$

то есть для большинства элементов энергия ядра отдачи очень мала — порядка единиц-десятков кэВ на ядро [3]. Таким образом возникают серьезные экспериментальные трудности при регистрации подобных процессов, поэтому, несмотря на то, что процесс УКРН предсказан достаточно давно, экспериментально зарегистрирован он был лишь в 2017 году [4].

На сегодняшний день в мире существует более 20 экспериментов по исследованию УКРН. Источниками нейтрино и антинейтрино нужных энергий (до 50 МэВ) являются ускорители, атомные реакторы и солнце. Эксперимент CENNS-10, о котором пойдет речь далее, нацелен на исследование УКРН от протон-протонного ускорителя SNS, Ок-Риджская национальная лаборатория (Oak Ridge National Laboratory), США.

1.2 Эксперимент CENNS-10

Наиболее полные данные по эффекту УКРН на ядрах аргона в настоящее время получены в эксперименте CENNS-10 [5]. Детектор представляет собой цилиндр из нержавеющей стали диаметром 21 см и высотой 61 см, помещенный в вакуумную рубашку и заполненный ~ 60 кг сжиженного аргона (24 кг в чувствительном объеме). Детектор помещен в пассивную защиту из свинца, меди и воды. Чувствительный объем просматривается двумя фотоумножителями модели Hamamatsu R5912. Схема установки в разрезе представлена на рисунке 2. Для переизлучения ультрафиолетового сцинтилляционного света жидкого аргона, имеющего длину волны 128 нм, в область спектральной чувствительности ФЭУ на их стекла нанесен слой тетрафенил-бутадиена (TPB).

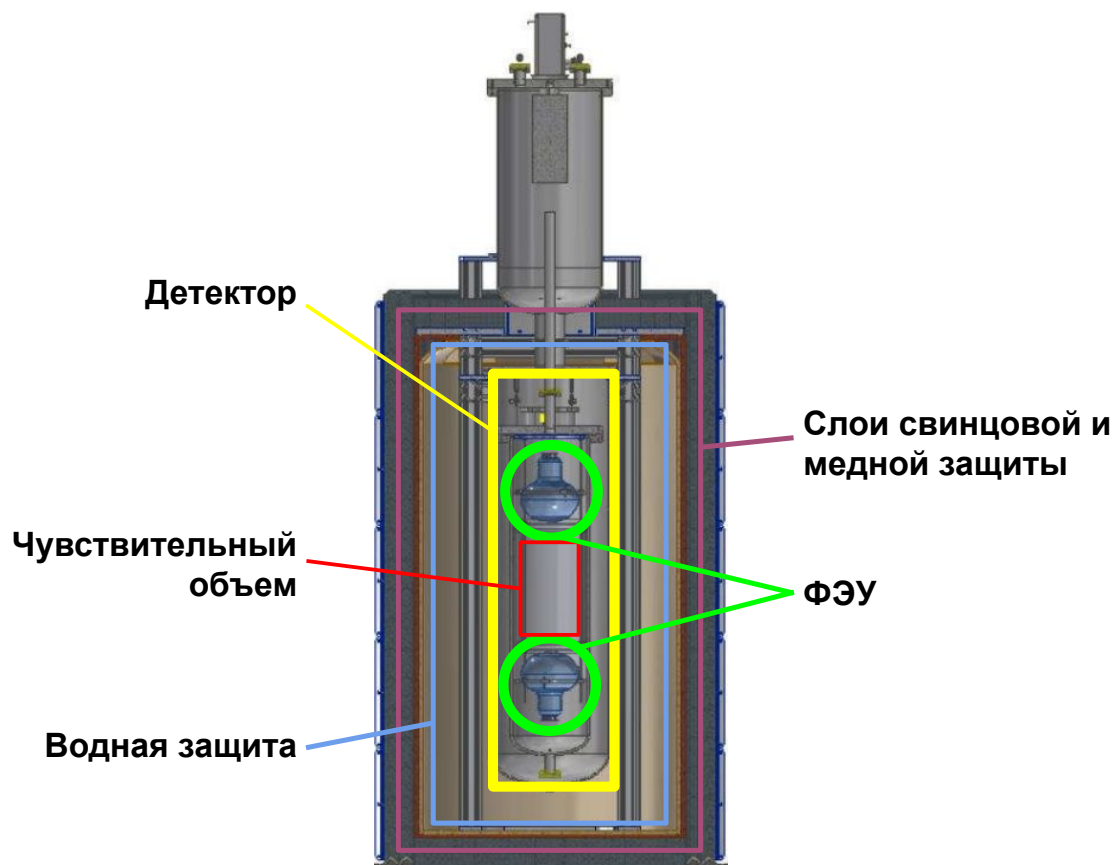


Рис. 2: Схема установки CENNS-10

2 Формат данных эксперимента CENNS-10 и их чтение

Набранные в рамках экспериментального сеанса (рана) данные представляют собой массив файлов формата `.bin`, в которых хранятся измерения АЦП в виде форм сигналов (далее – вейвформ). На этапе анализа, с помощью специального программного обеспечения, из них считывается и анализируется вся информация. Примером такого программного обеспечения является REDOffline.

REDOffline — программный пакет, разработанный в межкафедральной лаборатории экспериментальной ядерной физики (ЛЭЯФ). Внутри REDOffline на языке программирования C++ реализован обширный функционал по чтению, визуализации и интерпретации необработанных экспериментальных данных (далее — сырых данных) экспериментов RED-

100 и CENNS-10.

Для каждого рана, помимо бинарных файлов, в отдельном файле формата .cfg также сохраняется конфигурация системы сбора в момент проведения сеанса, содержащая в себе исчерпывающую информацию о настройках конкретного рана.

Для эксперимента CENNS-10 структура такого конфигурационного файла определена однозначным образом в используемой программе сбора данных [6]. Конфигурационный файл содержит общее описание набора данных (например время начала записи, число записанных событий, текстовый комментарий о наборе данных), а также описание конфигурации аппаратуры. В файле перечислены подключенные платы сбора данных и их настройки (в частности, частота семплирования АЦП, режим срабатывания триггера, время отсчитываемое до срабатывания триггера и после). Для каждой платы перечислены настройки имеющихся каналов, в том числе смещение рабочего диапазона АЦП по напряжению, индивидуальные пороги триггера, их названия в системе и сохранялись ли они в файл. Извлекаемые из файла конфигурации значения параметров используются в анализе для конвертации аппаратных единиц в физические величины, упрощая процесс интерпретации данных.

В контексте проведения такого масштабного эксперимента, как CENNS-10, производится набор внушительного объема данных, обработка и анализ которых требует обязательного согласования с настройками установки, содержащимися в конфигурационном файле. Ранее соответствующая информация вносилась в программу обработки вручную, что ощутимо замедляло процедуру анализа.

С учётом специфической структуры конфигурационного файла для программного пакета REDOffline был разработан дополнительный класс C++ Config. Его задача — чтение конфигурационного файла и представление его содержимого в виде объекта. В его реализацию входят методы чтения, парсинга, а также предоставления данных: как в виде словаря (std::map) запрашиваемых полей, так и в виде выходного файла. При этом сохраняются все логические связи между параметрами и их исходная иерархия. Например, статус включения одного из каналов АЦП,

описываемый как поле **enabled** фрагмента конфигурационного файла ниже:

```
V172X_Params (
    ...
    board0 (
        ...
        channel0 (
            ...
            enabled true
        )
    )
    ...
)
```

становится доступным по соответствующему составному ключу:

V172X_Params.board0.channel0.enabled

Стабильная версия модуля была успешно интегрирована в экосистему REDOffline. Тестирование подтвердило корректность извлечения и представления всех данных из конфигурационных файлов. Таким образом, задача автоматического чтения конфигурации была решена. Дальнейшая работа будет направлена на оптимизацию модуля и расширение его функциональности.

3 SPE-калибровка фотоумножителей детектора CENNS-10

3.1 Задачи калибровки и принцип работы ФЭУ

В ядерно-физическом эксперименте особое место занимает процедура калибровки детектора, представляющая собой комплекс мероприятий по определению рабочих параметров установки, ее подсистем и т. д. для дальнейшего использования этих параметров в анализе данных. ФЭУ — это широко используемый в физике высоких энергий прибор, переводящий световой поток (например, от жидкого сцинтиллятора) в электрический сигнал, амплитуда которого прямо пропорциональна количеству попавших на его вход фотонов.

Для корректной интерпретации этого электрического сигнала калиб-

ровка фотоумножителей (например SPE-калибровка) является обязательным элементом любого эксперимента с их участием.

Прежде чем произвести на выходе ФЭУ электронный сигнал, фотон (на рисунке 3 обозначен красной волнистой линией) попадает на поверхность фотокатода, с поверхности которого, в результате фотоэффекта выбивается фотоэлектрон. Далее, под действием специально направленного поля с фокусирующего электрода, электрон попадает в динодный каскад. Каждый динод представляет собой электрод, подведенное напряжение к которому растет по мере движения от катода к аноду. При попадании электрона на динод, в результате вторичной эмиссии выбивается уже несколько электронов, которые под действием приложенной разности потенциалов двигаются к следующему диноду и происходит размножение электронной лавины. В конце каскада расположен анод, к которому подсоединены электрические контакты, через которые в цепь поступает электрический ток от ФЭУ.

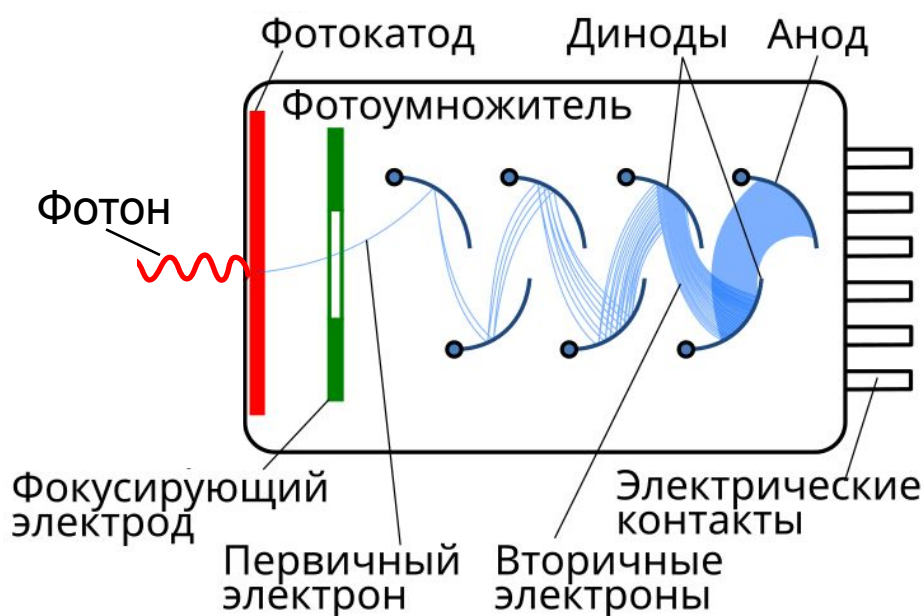


Рис. 3: Схема устройства ФЭУ

Как следует из природы вторичной эмиссии электронов, их размножение внутри ФЭУ носит вероятностный характер, поэтому существует определенное распределение по времени их поступления на анод, а также их суммарному количеству. От этих распределений зависит величина

электрического сигнала, который будет зарегистрирован электроникой установки.

Суть SPE-калибровки заключается в определении отклика ФЭУ на одиночный фотоэлектрон (SPE), выбитый с фотокатода. Одним из возможных способов проведения такой калибровки является использование светодиодов (LED), специально настроенных для перевода ФЭУ в одно-фотоэлектронный режим. Помимо ограничения на энергию создаваемых светом LED фотонов с целью минимизирования числа выбиваемых фотоэлектронов, такой режим подразумевает поступление фотонов на фотокатод с такой низкой частотой, чтобы свести к минимуму наложение вызываемых разными фотонами электронных лавин.

3.2 Методика анализа и оценка величины SPE-сигнала

Записанные в рамках калибровочного рана вейвформы направляются в REDOffline, где производится их чтение и обработка. В вейвформе производится поиск сигналов (импульсов) и вычисление их параметров, таких как ширина, амплитуда, площадь и т.д. Площадь импульса пропорциональна суммарному заряду электронной лавины.

Как было сказано ранее, тонкая настройка сигналов светодиодов минимизирует число событий, в которых от света LED было выбито более одного фотоэлектрона, поэтому на гистограмме распределения площадей обнаруженных импульсов ожидается видеть характерный пик, соответствующий событию с выбиванием одиночного фотоэлектрона с поверхности фотокатода ФЭУ.

Располагая информацией о коэффициенте усиления ФЭУ и величине сопротивления нагрузки можно оценить ожидаемый сигнал от SPE в единицах пВ · сек. В приближении простейшей RC-цепи дифференциальное уравнение для тока имеет вид:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{U}{R_{\text{нагр}}} + C \frac{dU}{dt} \quad (2)$$

В приближении малости второго слагаемого [7], получаем:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{U}{R_{\text{нагр}}} \quad (3)$$

Последующее интегрирование по времени левой и правой части с переносом напряжения нагрузки в левую дает выражение для оценки ожидаемой площади импульса. Для детектора CENNS-10 напряжение нагрузки на входе АЦП составляет 50 Ом, паспортный коэффициент усиления фэу Hamamatsu R5912 составляет 10^7 , заряд электрона – $1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Подставляя эти значения в формулу 3, получим оценку площади SPE-импульса:

$$S_{SPE} \sim 8 \cdot 10^{-11} \text{ В} \cdot \text{сек} = 80 \text{ пВ} \cdot \text{сек} \quad (4)$$

3.3 Обработка данных LED-ранов

На этом этапе был проведен анализ данных двух калибровочных LED-ранов эксперимента CENNS-10 в контексте модернизации процедуры чтения сырых данных.

На рисунке 4 представлены общие распределения площадей импульсов для SPE-ранов 510484 и 510485 (здесь и далее под «анализируемыми» будут подразумеваться данные канала 1, соответствующего верхнему фотомножителю детектора CENNS-10).

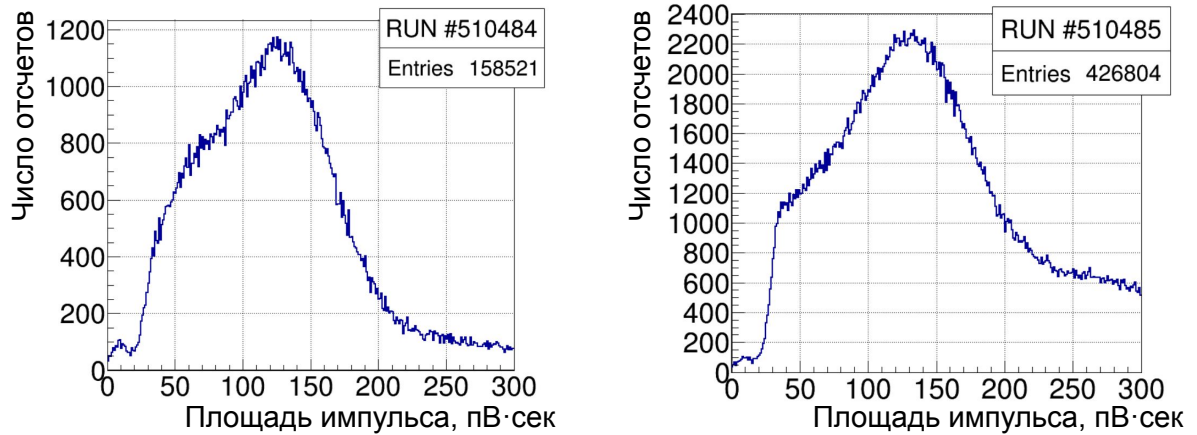


Рис. 4: Распределения площадей импульсов до отборов.

При обработке вейвформ программа REDOffline идентифицирует не только полезные сигналы, но и большое количество посторонних, в том

числе связанных с шумами электроники.

Между импульсами от фоновых сигналов и SPE-импульсами от светодиодов существует различие в форме и параметрах, такими как, например, время затухания, амплитуда и полная ширина.

В ходе последовательного анализа была обнаружена корреляция между полной шириной импульса и его площадью. Как видно на рисунке 5, проводя горизонтальную линию на уровне 8.5 шагов оцифровки можно заметить различие в поведении зависимости, которое указывает на различие источников и позволяет отбросить некоторое количество шумовых импульсов.

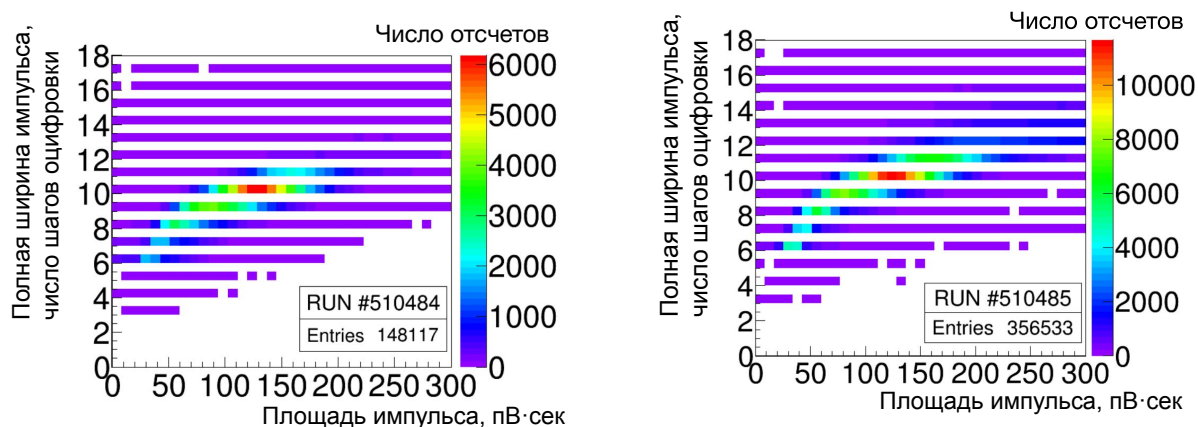


Рис. 5: Двумерные гистограммы распределений площадей импульсов от полной ширины.

Наложением отборов по полной ширине более 8.5 и менее 12 шагов оцифровки были получены распределения, представленные на рисунке 6. Далее, путем фитирования этих распределений гауссианом было получены значения средних и погрешностей:

$$\text{Ран } 510484 : 126.2 \pm 0.4 \text{ пВ} \cdot \text{сек} \quad (5)$$

$$\text{Ран } 510485 : 128.1 \pm 0.3 \text{ пВ} \cdot \text{сек} \quad (6)$$

Полученные значения примерно в полтора раза превышают грубую аналитическую оценку по формуле 4. Такое расхождение, учитывая упрощающие допущения, сделанные при выводе этой формулы, свидетельствует о хорошем согласии. Этот факт дополнительно указывает на корректность проведённых измерений.

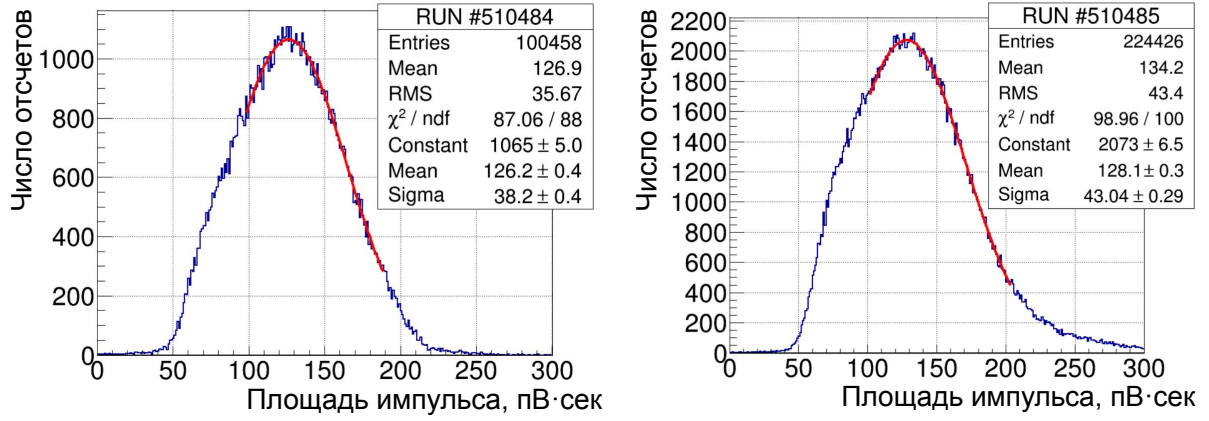


Рис. 6: Распределения площадей импульсов после отборов. Красная линия – фит.

4 Заключение

В первом семестре проводилось модернизация процедуры чтения файлов с экспериментальными данными. Была изучена общая структура программного пакета REDOffline и основные принципы его работы. Был разработан и протестирован класс, реализующий функционал по автоматизации получения настроек детектора из файла конфигурации ран.

Также, был проведен анализ двух калибровочных SPE-ранов. Выполнена задача по определению SPE-пика в распределении импульсов по площадям и проведено сравнение его среднего с теоретической оценкой. Полученные значения параметра находятся в разумном согласии с грубой теоретической оценкой $\sim 80 \text{ пВ} \cdot \text{сек}$ (см. формулу 4):

$$\text{Ран 510484} : 126.2 \pm 0.4 \text{ пВ} \cdot \text{сек} \quad (7)$$

$$\text{Ран 510485} : 128.1 \pm 0.3 \text{ пВ} \cdot \text{сек} \quad (8)$$

В дальнейшем планируется продолжить работу над модернизацией REDOffline в области чтения файлов и анализа данных эксперимента CENNS-10.

Список использованных источников

1. *Freedman D. Z.* Coherent effects of a weak neutral current // *Phys. Rev. D.* — 1974. — Mar. — Vol. 9, issue 5. — P. 1389–1392. — DOI: 10.1103/PhysRevD.9.1389.
2. *Balasi K., Langanke K., Martínez-Pinedo G.* Neutrino–nucleus reactions and their role for supernova dynamics and nucleosynthesis // *Progress in Particle and Nuclear Physics.* — 2015. — Vol. 85. — P. 33–81. — ISSN 0146-6410. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ppnp.2015.08.001>.
3. *Akimov D.* [и др.]. Calibration and characterization of the RED-100 detector at the Kalinin Nuclear Power Plant // *Journal of Instrumentation.* — 2024. — Нояб. — Т. 19, № 11. — T11004. — ISSN 1748-0221. — DOI: 10.1088/1748-0221/19/11/t11004.
4. *Akimov D., Albert J., An P., [et al.].* Observation of coherent elastic neutrino-nucleus scattering, *Science* // *Science.* — 2017. — Sept. — Vol. 357, no. 15. — P. 1123–1126.
5. *Akimov D.* [и др.]. First constraint on coherent elastic neutrino-nucleus scattering in argon // *Phys. Rev. D.* — 2019. — Дек. — Т. 100, вып. 11. — С. 115020. — DOI: 10.1103/PhysRevD.100.115020.
6. *Loer B.* bloer/daqman: Citation Release. — Вер. v0.4. — 07.2019. — DOI: 10.5281/zenodo.3347152.
7. *Акимов Ю. К.* Фотонные методы регистрации излучений. — 2-е, испр. и доп. — Дубна : ОИЯИ, 2014. — С. 323. — ISBN 978-5-9530-0380-3.