

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 524.1

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К БАКАЛАВРСКОЙ  
ДИПЛОМНОЙ РАБОТЕ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРОНОВ ОТ ШИРОКИХ  
АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ ПО ДАННЫМ УСТАНОВКИ  
ПРИЗМА-32**

Руководитель НИР,  
к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ Д. М. Громушкин

Студент

\_\_\_\_\_ А. Д. Почестнев

Москва 2022

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРОНОВ ОТ ШИРОКИХ  
АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ ПО ДАННЫМ УСТАНОВКИ  
ПРИЗМА-32**

Студент	_____ А. Д. Почестнев
Научный руководитель, к.ф.-м.н.	_____ Д. М. Громушкин
Рецензент, к.ф.-м.н.	_____ О. Б. Щеголев
Секретарь ГЭК, к.ф.-м.н.	_____ А. А. Кириллов
Зав. каф. №40, д.ф.-м.н., проф	_____ М. Д. Скорохватов

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>1 Установка ПРИЗМА-32</b>	<b>8</b>
1.1 Описание установки . . . . .	8
1.2 ЭН-детектор . . . . .	9
1.3 Система регистрации . . . . .	10
1.4 Методика регистрации электромагнитной и нейтронной компонент ШАЛ . . . . .	12
1.5 Программное обеспечение . . . . .	13
<b>2 Контроль работы установки ПРИЗМА-32</b>	<b>16</b>
2.1 Программное обеспечение для контроля работы установки .	16
2.2 Настройка детекторов . . . . .	20
2.2.1 Критерии настройки . . . . .	20
2.2.2 Стенд для тестирования ФЭУ . . . . .	21
2.2.3 Ремонтные работы . . . . .	22
<b>3 Работа с данными</b>	<b>27</b>
3.1 База данных . . . . .	28
3.2 Корректность работы детекторов в установке . . . . .	30
3.3 Объединение событий, зарегистрированных одновременно двумя кластерами или двумя динодами . . . . .	35
3.4 Данные 7-го динода . . . . .	38
<b>4 Обработка экспериментальных данных установки ПРИЗМА-32</b>	<b>41</b>
4.1 Временное распределение нейтронов . . . . .	41
4.2 Спектр энергосвечения ШАЛ . . . . .	44
4.3 Спектр по числу нейтронов . . . . .	46

<b>Заключение</b>	<b>51</b>
<b>Список использованных источников</b>	<b>52</b>
<b>А Временные распределения тепловых нейтронов каждого детектора установки ПРИЗМА-32</b>	<b>56</b>



# ВВЕДЕНИЕ

Изучение спектра и состава космических лучей (КЛ) на сегодняшний день является важной и не тривиальной задачей, над которой работает множество научных групп. Наибольший интерес вызывает проблема излома, то есть изменения характера спектра космических лучей вблизи энергий  $(3 - 4) \cdot 10^{15}$  эВ.

Существует два метода регистрации космических лучей:

- прямой, в котором измеряется энергия и заряд первичных частиц КЛ за пределами атмосферы с помощью космических аппаратов, в том числе размещенных на МКС, как AMS [1], или высотных аэростатов;
- косвенный — метод широких атмосферных ливней (ШАЛ), основанный на регистрации продуктов многочисленных взаимодействий первичных частиц (в большинстве случаев  $E > 10^{13}$  эВ) с ядрами атомов и электронов атмосферы;

В связи с тем, что с ростом энергии интенсивность потока космических лучей стремительно снижается, интересующий диапазон энергий, а именно  $10^{15} - 10^{18}$  эВ, на данный момент недоступен для экспериментов на ускорителях и затруднен для прямой регистрации первичных частиц космических лучей за пределами атмосферы, так как падает всего несколько частиц с энергией  $10^{15}$  эВ на  $1 \text{ м}^2$  в год, а с энергией  $10^{18}$  эВ — несколько частиц на  $1 \text{ км}^2$ . Поэтому для изучения спектра и состава КЛ высоких энергий используются наземные установки для исследования широких атмосферных ливней.

Иницилируя широкий атмосферный ливень, одна высокоэнергетическая первичная частица может создать гигантский каскад фермионов и бозонов, который распространяется с близкой к световой скоростью через атмосферу и может достигать уровня моря при условии, что у события достаточно энергии. Широкий атмосферный ливень состоит из электромагнитной, мюонной и адронной компоненты, состав которых представлен

на рисунке 1.

Электромагнитная и мюонная компоненты ШАЛ являются наибольшими по числу частиц, поэтому основная часть установок, созданных для изучения ШАЛ, направлена на изучение этих компонент. В качестве примеров можно выделить следующие установки: ШАЛ МГУ [2], EAS-TOP [3], Tibet-AS $\gamma$  [4] и ARGO-YBJ [5], AGASA [6], Telescope Array [7], ДЕКОР [8] и др.

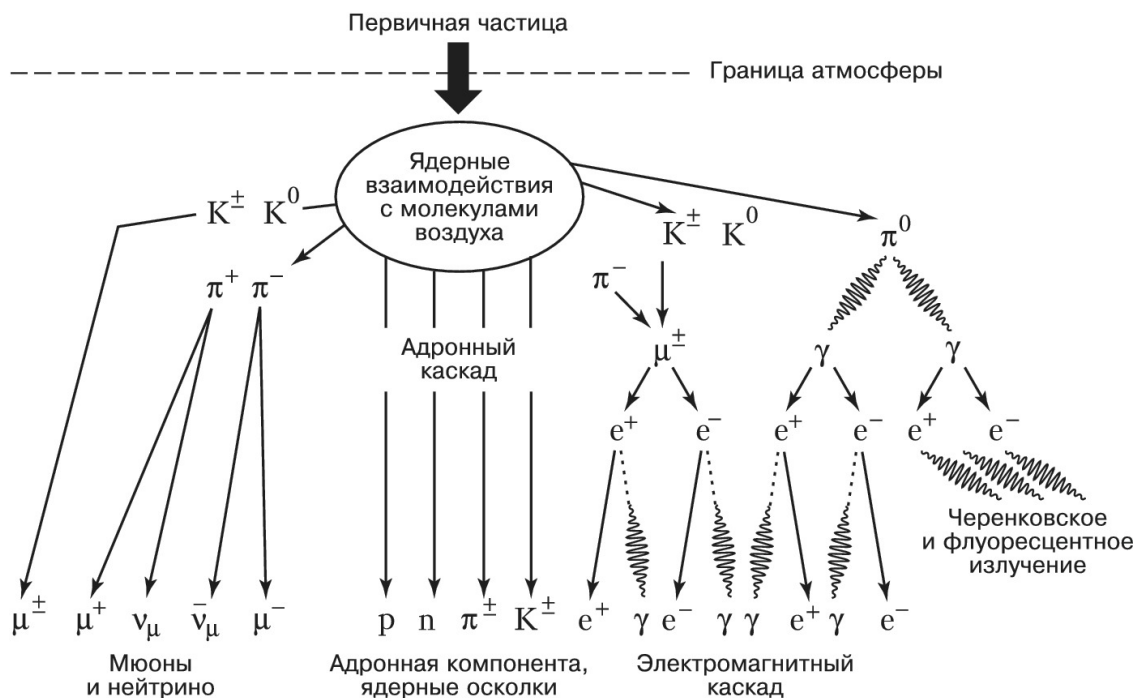


Рисунок 1 — Структура развития ШАЛ

Но наибольший интерес представляет изучение адронной компоненты ШАЛ, поскольку она сохраняет наименее искаженные данные об изначальной частице и ее энергии. Эксперименты с непосредственным изучением адронов ШАЛ сталкиваются с трудностями по причине их дороговизны и высокой трудоемкости, примером этому служат KASCADE [9], в котором был создан калориметр большой площади, или CHACALTAYA [10], RAMIR [11] и HADRON [12], основанные на специализированных адронных детекторах большой площади.

Альтернативным методом изучения адронной компоненты ШАЛ является регистрация нейтронов, образованных при взаимодействии адронной части ШАЛ с ядрами вещества вблизи детектора. Эти нейтроны термализуются, то есть замедляются, благодаря множеству последовательных

упругих соударений с веществом вблизи детектора и могут быть зарегистрированы детекторами тепловых нейтронов.

Связь между адронной компонентой ШАЛ и тепловыми нейтронами была изучена на Тянь-Шаньском нейтронном мониторе и нейтронном мониторе г. Мехико. Также были получены в работах [13], [14] временные зависимости интенсивности тепловых нейтронов и корреляционная зависимость между кратностью нейтронов и мощностью ливня.

В работе [15] Ю.В. Стенькиным и J.F. Valdes-Galicia исследовалась возможность изучения адронной компоненты ШАЛ через регистрацию тепловых нейтронов с помощью сцинтилляционных детекторов, в результате в качестве рабочего вещества детектора был предложен неорганический сцинтиллятор ZnS с добавками изотопа  $^6\text{Li}$ . С целью дальнейшего изучения адронной компоненты ШАЛ был разработан проект PRISMA (PRImary Spectrum Measuring Array) [16], основанный на применении электромагнитно-нейтронных сцинтилляционных детекторов (эн-детекторов), способных регистрировать одновременно электромагнитную компоненту и адронную, через регистрацию тепловых нейтронов.

В проект PRISMA на данный момент входят несколько установок, расположенных в России и Китае. На рисунке 2, представлена теоретическая модель связи между адронной компонентой ШАЛ и тепловыми нейтронами на тех высотах над уровнем моря, на которых расположены установки проекта PRISMA. [17]

Первой в 2012 г. в совместном проекте НИЯУ МИФИ с ИЯИ РАН на базе экспериментального комплекса (ЭК) НЕВОД (НИЯУ МИФИ) для проверки данного метода адронной компоненты ШАЛ была разработана установка ПРИЗМА-32 [18], находящаяся внутри помещения 4-го этажа здания ЭК НЕВОД на высоте 170 м. над уровнем моря. Установка состоит из двух кластеров, в которые входят по шестнадцать эн-детекторов. Охватываемая площадь ПРИЗМА-32  $\sim 500 \text{ м}^2$ , а площадь самого детектора  $0.36 \text{ м}^2$ . Регистрация испарительных нейтронов осуществляется посредством неорганического сцинтиллятора  $\text{ZnS}(\text{Ag})+\text{LiF}$ , обогащенного до 90% изотопом  $^6\text{Li}$ .

В 2013 г. в Тибете в лаборатории Янбаджайн на высоте 4300 м. над уровнем моря были поставлены 4 эн-детектора с таким же сцинтиллятором, как в ПРИЗМА-32 и площадью детектора 0.35 м<sup>2</sup>. [19]

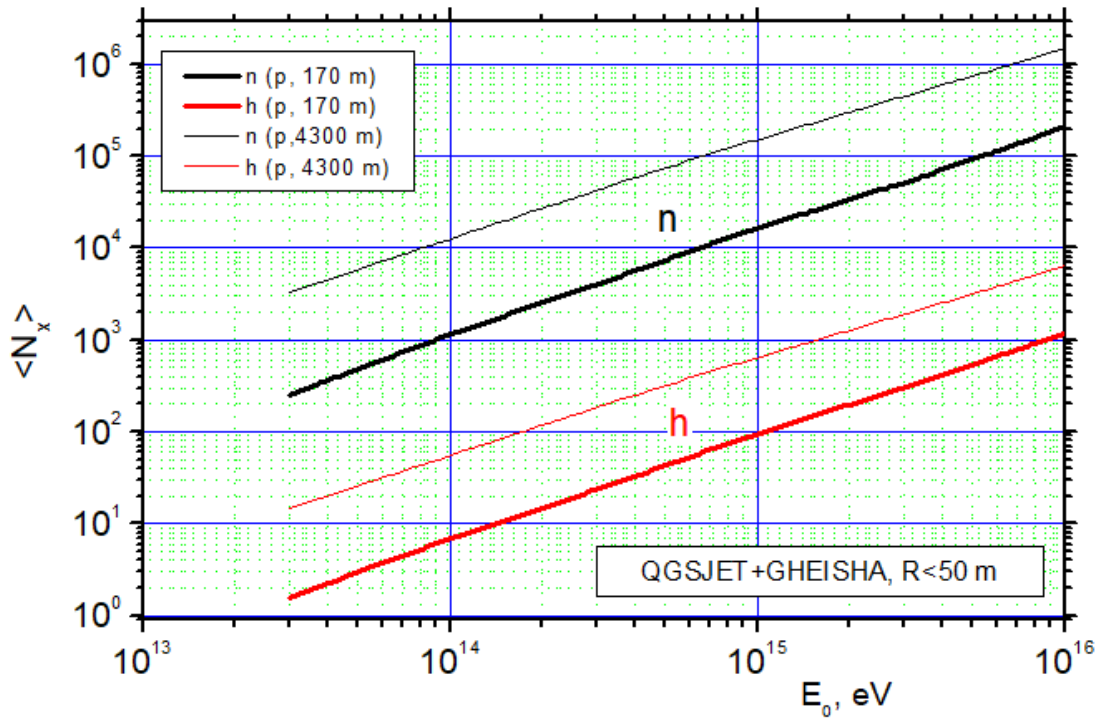


Рисунок 2 — Связь между адронной компонентой ШАЛ и тепловыми нейтронами на разных высотах над уровнем моря

В 2015 г. на базе экспериментального комплекса НЕВОД (НИЯУ МИ-ФИ) была создана установка УРАН [20], расположенная на двух крышах ЭК НЕВОД на высоте 170 м. над уровнем моря, такое расположение внесет свой вклад в различие временных распределений тепловых нейтронов, полученных на УРАН и ПРИЗМА-32. УРАН состоит из шести кластеров, в которые входят по двенадцать эн - детекторов, на каждой крыше находятся по 3 кластера. Площадь детектора составляет 0.36 м<sup>2</sup>, а общая площадь установки  $\sim 1000$  м<sup>2</sup>. Рабочим веществом детектора в УРАН является неорганический сцинтиллятор ZnS(Ag)+B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Начиная с 2018 г., в Тибете на базе Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO) на высоте 4410 м. над уровнем моря расположен Electron–Neutron Detector Array (ENDA) [21], на текущий момент размеще-

но шестнадцать из четырехсот планирующихся эн-детекторов, в их планах охватываемая площадь установки будет равна  $\sim 10000 \text{ м}^2$ . Площадь детекторов в ENDA  $0.36 \text{ м}^2$ , а рабочее вещество - неорганический сцинтиллятор  $\text{ZnS}(\text{Ag})+\text{B}_2\text{O}_3$ .

Максимальной длительностью набора из всех установок проекта PRISMA обладает установка ПРИЗМА-32, данные которой рассматриваются в этой работе.

### **Цель работы:**

Анализ экспериментальных данных за 2012 — 2021 гг., полученных на установке ПРИЗМА-32 для исследования нейтронной компоненты широких атмосферных ливней.

Для реализации поставленной цели были выполнены следующие задачи:

- Созданы методы и программное обеспечение для анализа работоспособности детекторов установки ПРИЗМА-32.
- Создана база данных установки ПРИЗМА-32.
- Разработаны алгоритмы обработки информации ШАЛ, полученной на установке.
- Подготовлен массив экспериментальных данных установки ПРИЗМА-32 со стабильной работой детекторов за 02.2012 — 12.2021 гг.

### **Научная новизна:**

В работе впервые представлены данные по заряженной и нейтронной компонентам ШАЛ, полученные на установке, предназначенной для регистрации нейтронов ШАЛ, за столь длительный период времени ( $\sim 10$  лет).

# 1 УСТАНОВКА ПРИЗМА-32

## 1.1 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка ПРИЗМА-32, схема которой представлена на рисунке 1.1, находится внутри помещения 4-го этажа здания экспериментального комплекса НЕВОД вокруг черенковского водного детектора на высоте 170 м. над уровнем моря. Установка состоит из 32 детекторов, расположенных с шагом  $5\text{ м} \times 2.5\text{ м}$ , разбитых на два кластера по 16 детекторов, занимающих площадь  $\sim 500\text{ м}^2$  [17]. Диапазон измерений установки:

- по заряженным частицам: 20 — 75000/дет.;
- по нейтронам: 1 — 1000/дет.;
- по первичной энергии: (0.3 — 30) ПэВ;

Основной задачей исследований на установке является изучение спектра и состава космических лучей в области «излома»  $3 \times 10^{15}$  эВ посредством анализа нейтронной компоненты ШАЛ.

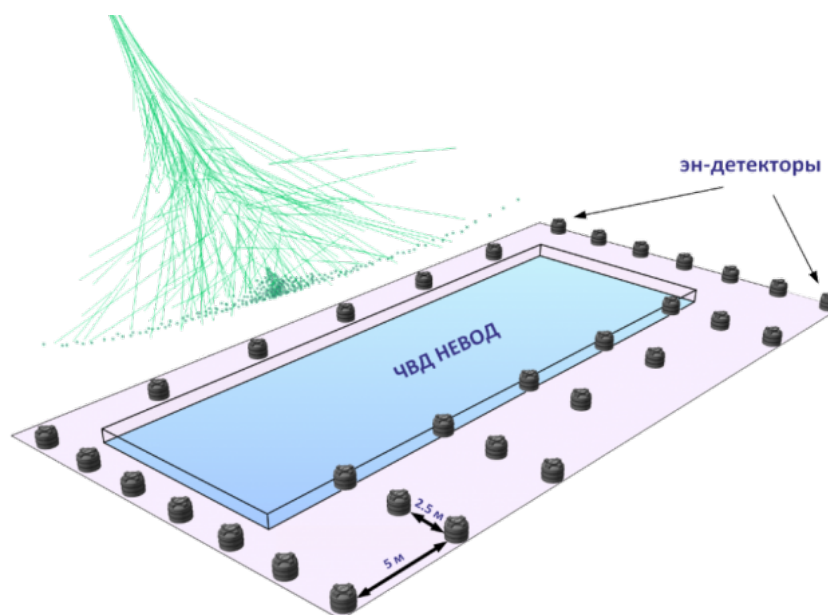


Рисунок 1.1 — Экспериментальная установка ПРИЗМА-32

## 1.2 ЭН-ДЕТЕКТОР

В установке ПРИЗМА-32 используются эн-детекторы, представленные на рисунке 1.2. Они способны регистрировать сразу две компоненты ливней: электромагнитную, по групповому прохождению заряженных частиц, в основном электронов ( $\epsilon$ ), и адронную, через тепловые нейтроны ( $n$ ).

Корпусом эн-детектора является светонепроницаемая полиэтиленовая бочка черного цвета (объемом 200 л с высотой 570 мм и диаметром 740 мм) с установленным в ней диффузно-отражающим конусом. В верхней части конуса расположен ФЭУ-200, который закреплен на крышке бочки специальной подвеской. В основании светонепроницаемого корпуса расположен специализированный неорганический сцинтиллятор  $ZnS(Ag)$  с добавкой  ${}^6LiF$  в виде тонкого слоя. Эффективная площадь сцинтиллятора в таком детекторе составляет  $\sim 0.36 \text{ м}^2$ .

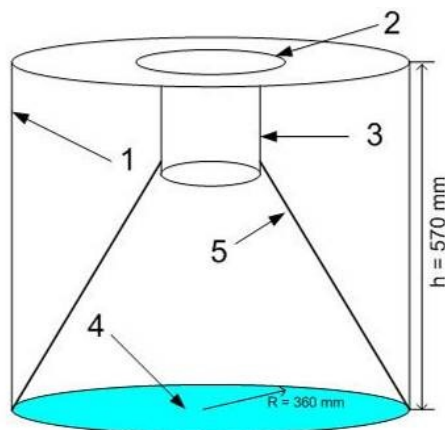


Рисунок 1.2 — Конструкция нейтронного детектора. 1 — светозащитный корпус детектора; 2 — крышка с подвеской; 3 — ФЭУ-200; 4 — сцинтиллятор  $ZnS(Ag)+{}^6Li$ ; 5 — светоотражающий конус.

Регистрация тепловых нейтронов происходит следующим образом: используется сплав  $ZnS(Ag)$  и  $LiF$ , обогащенного до 90%  ${}^6Li$ , который захватывает нейтрон вследствие реакции:



где образовавшиеся  $\alpha$  частица и ядро трития вызывают голубое свечение

сернистого цинка в видимом диапазоне волны. Кроме того, при введении в качестве примеси Ag в количествах порядка 0.01% сцинтилляционная эффективность возрастает из-за сильного увеличения голубого излучения. Схема регистрации тепловых нейтронов в сцинтилляторе ZnS(Ag) с добавкой LiF показана на рисунке 1.3.

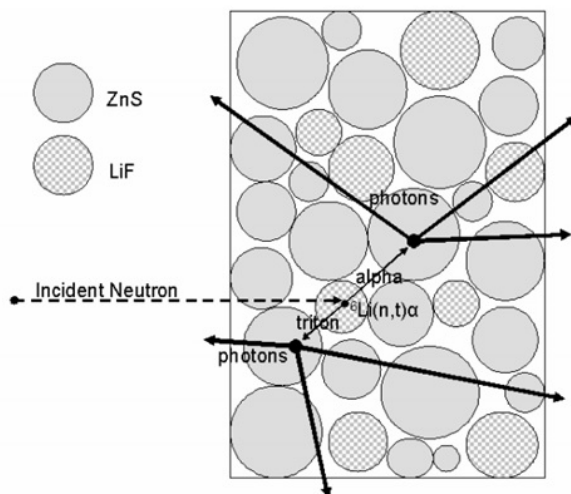


Рисунок 1.3 — Регистрация тепловых нейтронов на сцинтилляторе ZnS(Ag) с добавкой LiF

Стоит отметить, что такой выбор сцинтиллятора для эн-детектора обусловлен тем, что он имеет самые большие показатели светового выхода, как для тяжелых частиц, так и для электромагнитной компоненты, из известных аналогов. За один захват нейтрона ZnS(Ag) испускает  $\sim 160000$  фотонов. Его недостатком является непрозрачность к собственному излучению, поэтому в детекторах установки он присутствует в качестве тонкого слоя со средней толщиной около  $30 \text{ мг/см}^2$ .

### 1.3 СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ

Схема подключения детекторов и электроники установки ПРИЗМА-32 показана на рисунке 1.4. Детектирующий блок с ФЭУ подключается к высоковольтному источнику питания, сбор информации осуществляется с двух динодов делителя ФЭУ 12-го и 7-го, это связано с тем, что 12-й динод при регистрации мощного ШАЛ приходит в насыщение, а 7-й динод имеет коэффициент усиления в 60 — 80 раз меньше, что позволяет расширить



диапазон энергий регистрируемых ШАЛ.

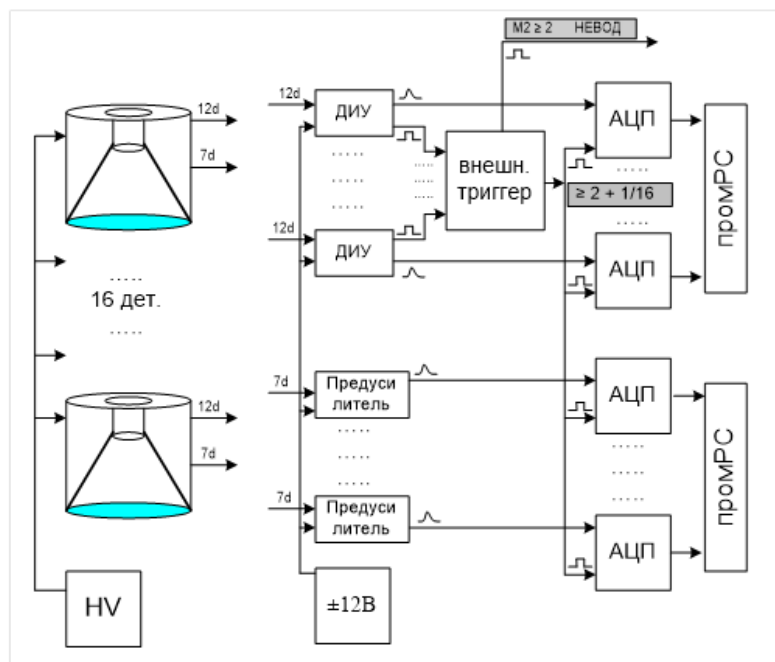


Рисунок 1.4 — Схема подключения детекторов и электроники установки ПРИЗМА-32

Аналоговый сигнал с 12-го динода поступает на дискриминатор-интегратор-усилитель (ДИУ), который питается от низковольтного источника. На ДИУ импульсы интегрируются с постоянным временем 1 мкс. ДИУ при превышении порога в 3 — 4 мВ вырабатывает триггерный импульс, который поступает на триггерный блок, который вырабатывает сигнал запуска (TTL) для АЦП при одновременном срабатывании двух и более любых детекторов, кроме этого сигнал вырабатывается от любого детектора на каждое шестнадцатеричное срабатывание триггера.

Аналоговый сигнал с 7-го динода поступает на предусилитель, у которого есть возможность изменения коэффициента усиления, а постоянная времени интегрирования такая же, как и для ДИУ. Сигнал далее идет на АЦП, который также соединен с компьютером.

У каждого кластера есть свой пункт сбора информации, который состоит из:

- двух промышленных компьютеров;
- 8 АЦП по четыре на каждый компьютер;
- монитора и блока переключения между компьютерами;
- источника высокого напряжения — 1800 В;

- распределительного блока для поканальной регулировки высокого напряжения;
- источника низковольтного питания  $\pm 12$  В и распределительного блока;
- триггерного блока;

Каждый кластер работает независимо друг от друга.

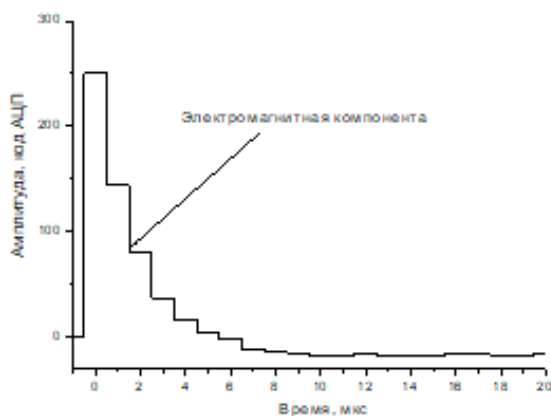
В установке ПРИЗМА-32 для оцифровки аналоговых сигналов используется четырехканальные АЦП (PCI-9810) фирмы ADLINK. [22] Основные характеристики АЦП PCI-9810:

- многофункциональный адаптер PCI, 4SE каналов АЦП, FIFO, 3DI, таймер;
- каналов аналогового ввода: 4, с общим проводом: 4;
- диапазоны входного сигнала: биполярного, по напряжению:  $-5...+5, -1...+1$  В;
- разрядность: 10 бит;
- коммутатор: сканирование каналов программное;
- максимальная частота сканирования (разные каналы): 20 МГц;
- буфер памяти: объем 64 кб;
- режимы передачи данных: программный, по прерыванию, по каналу ПДП;
- тактовая частота: 20 МГц;

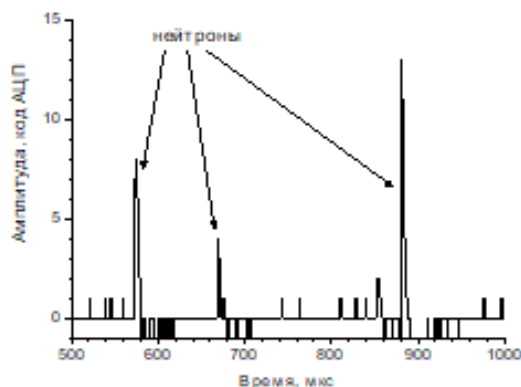
## 1.4 МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ И НЕЙТРОННОЙ КОМПОНЕНТ ШАЛ

Установка ПРИЗМА-32 способна одновременно регистрировать две основные компоненты широких атмосферных ливней: адронную, через регистрацию тепловых нейтронов, и электромагнитную. АЦП ADLINK PCI-9810 при оцифровке отклика установки получает осциллограмму в 20000 точек с шагом в 1 мкс. В случае прохождения ШАЛ через детектор, сначала регистрируется электромагнитная компонента, как показано на рисунке

1.5, значение энергосодержания электромагнитной компоненты определяется по значению максимального пика начала осциллограммы, который можно рассмотреть ближе на рисунке 1.5а. Начиная с 100 мкс до 20000 мкс каждый пик, превышающий четыре кода АЦП, распознается установкой, как нейтрон, что показано на рисунке 1.5б. Как видно из рисунков, импульсы, вызванные захватом нейтронов, хорошо разделяются во времени.



(а) Электромагнитная компонента



(б) Нейтроны

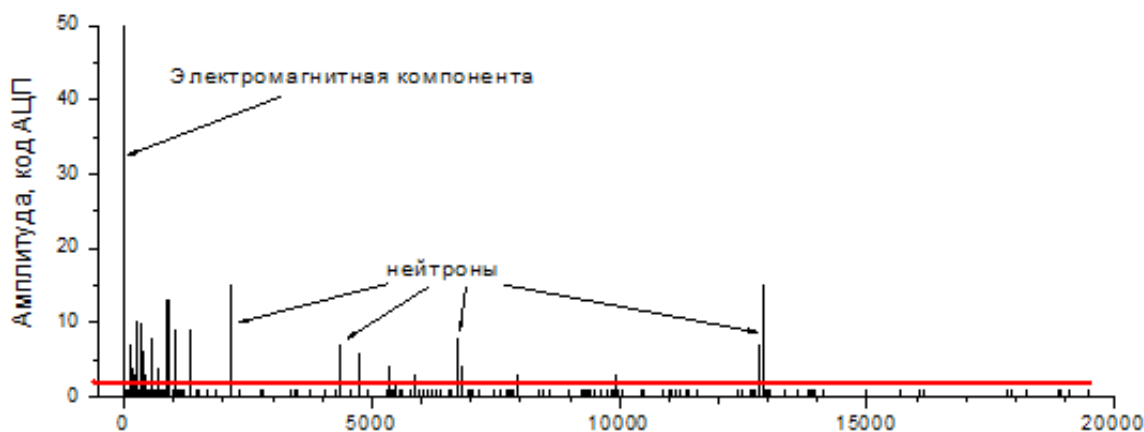


Рисунок 1.5 — Осциллограмма зарегистрированного ШАЛ

## 1.5 ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Для первичной обработки информации, используются специализированные онлайн программы, которые при срабатывании триггера опрашивают все каналы АЦП. На каждом кластере и на каждом диноде установки используются идентичные программы. Для 12-го динода — программа on-line\_EAS\_12d. Для 7-го динода — программа on-line\_EAS\_7d.

Меню on-line\_EAS\_12d представлено на рисунке 1.6

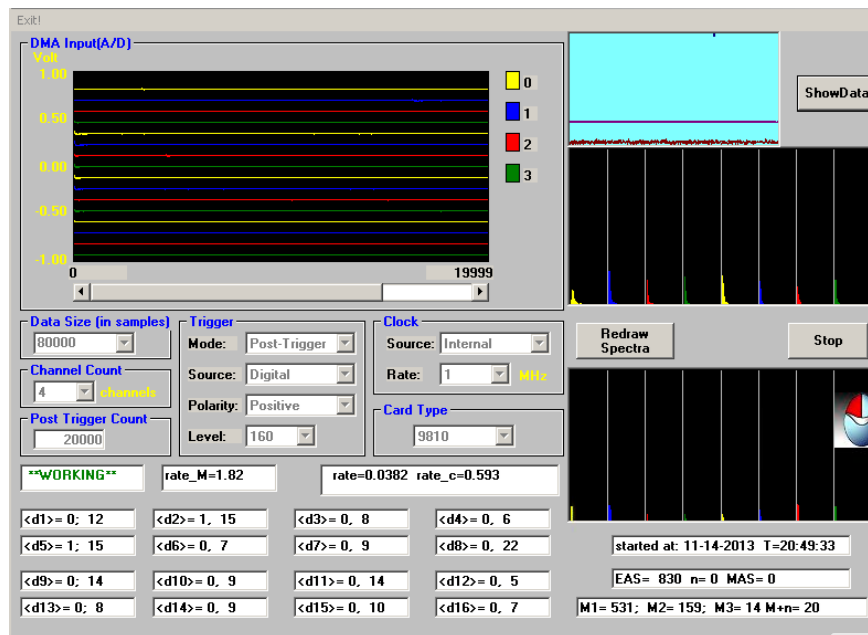


Рисунок 1.6 — Меню программы on-line\_EAS\_12d

Основные задачи, выполняемые программой:

- определение амплитуд энерговыделения электромагнитной компоненты;
- определение для каждого детектора числа нейтронов, зарегистрированных в течение 20 мс после прихода ливня, и сохранение их временного распределения с шагом 100 мкс;
- присвоение значения программного триггера, основанного на слове мастеров;
- запись основных параметров работы установки (каждые 5 минут записывается информация о “мертвом времени”, темпе счета тепловых нейтронов и “заряженных частиц”, один раз в сутки производится запись распределения по числу нейтронов в событиях и спектра энерговыделений для каждого детектора);
- сохранение осциллограмм мощных событий
- метка события абсолютным временем, которое дальше используется для сшивки данных разных кластеров.

Для отбора и классификации событий используются следующие триггеры (каждый триггер записывается в виде “1” в соответствующий бит слова мастеров M):

- Триггер M0 = 0: случайный программный триггер, используется для

определения фона тепловых нейтронов, запускается каждые 5 минут.

- Триггер M1 = 1: если сработало  $\geq 2$  эн-детекторов, энерговыделение на каждом из них должно превысить 10 частиц;
- Триггер M2 = 2: суммарное энерговыделение в установке должно превысить 40 релятивистских частиц ( $\sum E \geq 100$ )
- Триггер M3 = 4: суммарное число зарегистрированных нейтронов в событии должно быть больше 5 штук ( $\sum N_n \geq 5$ );
- Триггер M4 = 7: если сработали все триггеры (M1 + M2 + M3).

Примеры записи первичных экспериментальных данных представлены на рисунках 1.7 и 1.8.

Время записи события	Имя файла	Энерговыделение и число нейтронов в детекторе (A1 Nn1 ... A16 Nn16)
38776.63	553 0 1	1 0 0 0 0 0 0 0 9 0 0 0 5 0 5 0 5 0 6 0 1 0 1 0 0 0 0 0 1 0 2 0
38856.09	554 1 1	2 1 0
38953.96	555 0 0	0 0 0 0 1 0
39080.34	556 2 3	0 0 0 0 3 1 1 1 4 0 2 0 1 0 2 0 7 0 3 0 2 0 3 0 3 0 3 0 1 0 4 0 5 0
39117.52	557 1 1	0 0
39204.54	558 10 7	33 2 31 0 7 0 24 0 52 2 20 2 62 1 244 1 67 2 37 0 23 0 6 0 7 0 5 0 6 0 3 0
39253.96	559 0 1	1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0
39307.72	560 1 1	0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 2 0 0 0 3 0 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
39334.13	56 0 1	3 0 0 0 6 0
39364.6	562 2 1	1 1 0

Рисунок 1.7 — Пример записи файла с основными параметрами зарегистрированных событий.

Номер RUN от начала суток	Имя файла	Число зарегистрированных нейтронов	Число зарегистрированных заряженных частиц
1 .034	1.15	0 1 1 1 2 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 2	17 10 5 4 9 6 9 9 5 2 8 6 6 10 14 14
2 .035	1.15	1 0 2 0 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 2 0 2 1	10 4 6 16 9 6 3 15 4 9 4 11 4 13 3
3 .033	1.12	1 1 2 0 1 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 2	15 11 9 7 19 6 10 9 12 4 6 5 9 6 6 10
4 .034	1.13	1 3 1 0 3 1 2 0 0 0 1 0 2 0 1 0 18	15 6 3 9 5 8 10 11 6 8 4 12 10 11 6
5 .034	1.14	1 2 3 1 2 0 0 0 3 0 0 1 0 0 1 1 19	11 7 4 13 6 6 3 10 6 5 6 8 11 11 8
6 .033	1.1	1 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 2 0 11	13 9 5 11 7 14 3 9 1 11 1 5 10 10 8
7 .033	1.1	2 1 2 2 0 0 0 1 1 1 1 0 0 1 0 13	8 2 7 12 4 10 9 9 2 6 5 7 9 7 8
8 .033	1.1	1 0 1 1 1 2 2 1 0 0 0 0 0 0 0 15	11 5 7 18 5 13 3 15 4 5 4 10 7 12 7
9 .035	1.17	1 1 3 2 1 0 0 1 0 0 1 0 2 0 0 0 9	8 6 3 15 4 6 5 8 4 10 5 8 9 15 7
10 .034	1.15	2 2 1 0 3 0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 0 2 1	10 4 7 14 3 12 8 8 3 3 4 4 13 8 6
11 .036	1.14	2 0 1 0 3 0 1 1 0 0 1 0 1 2 4 0 13	11 6 3 12 10 7 7 10 9 8 3 7 6 13 6
12 .036	1.2	0 0 0 0 1 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 13	9 7 4 12 9 12 9 12 7 4 6 10 9 13 3
13 .034	1.13	0 2 1 3 5 0 0 1 1 1 0 0 0 1 0 0 15	15 6 5 17 2 10 3 13 6 10 4 12 5 15 5

Рисунок 1.8 — Пример записи файла, содержащего данные о времени, числе запусков АЦП, темпе счета тепловых нейтронов и заряженных частиц.

## 2 КОНТРОЛЬ РАБОТЫ УСТАНОВКИ ПРИЗМА-32

### 2.1 ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ РАБОТЫ УСТАНОВКИ

Основываясь на данных, полученных после первичной обработки проводится анализ работоспособности детекторов и расчет их рабочих параметров. Для автоматизации этого процесса на языке программирования Python с использованием библиотек Pandas [23], NumPy [24], Matplotlib [25], PyQt6 [26] и Python-Docx [27] создано программное обеспечение (ПО) для контроля работы установки ПРИЗМА-32.

ПО работает по следующему принципу. При запуске программы из терминала пользователь сначала видит графический интерфейс, сделанный с помощью библиотеки PyQt6. В интерфейсе пользователь может выбрать несколько параметров:

- временной диапазон, за который будет произведен сбор первичной информации из файлов;
- файловый путь к первичным данным, примеры которых были представлены на рисунках 1.7 и 1.8;
- файловый путь к папке, в которую сохраняется справка о работе установки;

Полученная информация, записывается в специальный тип данных библиотеки Pandas — DataFrame. Информацию, представленную в виде DataFrame легко обрабатывать, для нее доступен спектр функций различных библиотек Python, специализирующихся на задачах анализа данных. Используя методы библиотек Pandas и NumPy программа фильтрует, систематизирует и визуализирует первичную информацию. Для визуализации данных используется Matplotlib.

Результатом работы ПО является dosx-файл, сделанный с помощью библиотеки Python-Dosx, в котором представлена справка о работе установки за выбранным пользователем период времени. Справка содержит данные о:

- продолжительности работы кластеров установки;
- числе импульсов в событии, отобранных как нейтрон;
- скорости счета событий;
- амплитудных распределений сигналов;

На рисунках 2.1 — 2.6 и таблицах 2.1 — 2.5, представлены примеры графиков и таблиц, входящих в справку о работе установки.  $Fr$  — кратность срабатывания детекторов,  $A$  — амплитуда события в кодах АЦП.

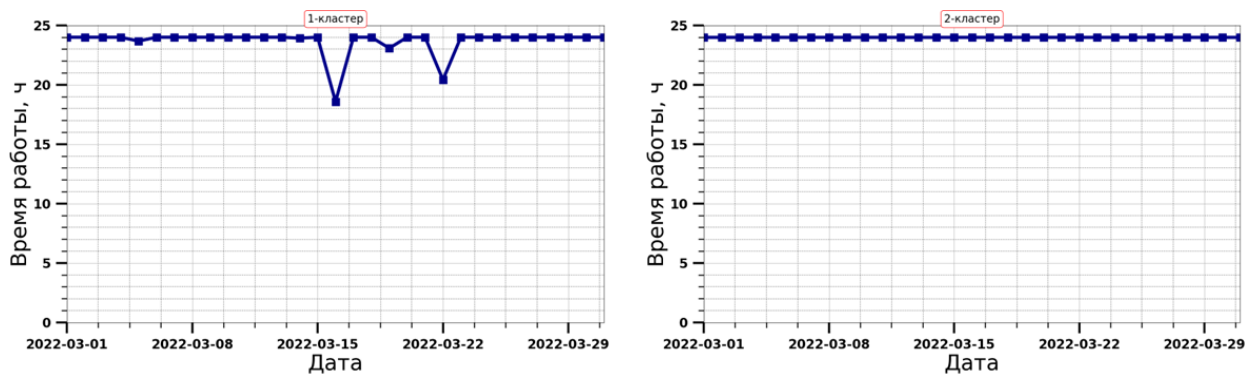


Рисунок 2.1 — Продолжительность работы кластера

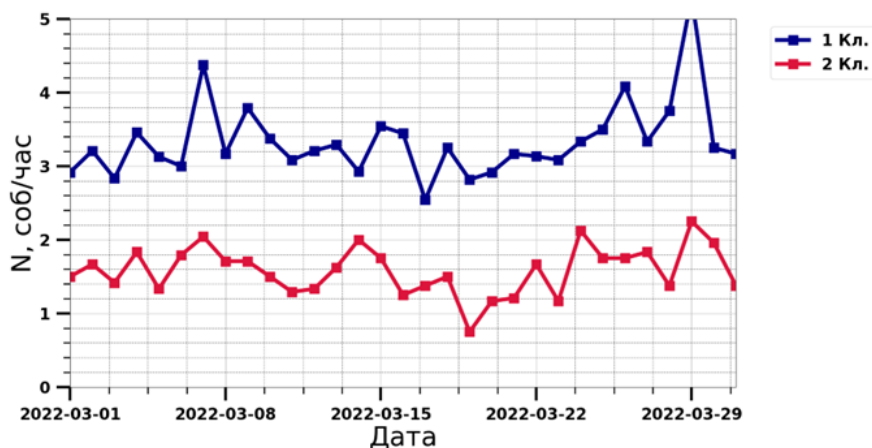


Рисунок 2.2 — Скорость счета событий  $Fr \geq 4$ ,  $A_9 > 5$

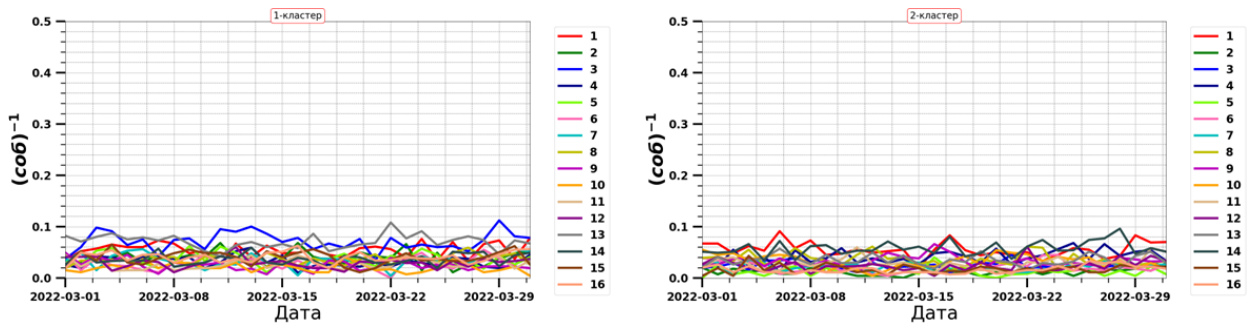


Рисунок 2.3 — Число событий, отобранных как нейтрон, при самозапуске кластера

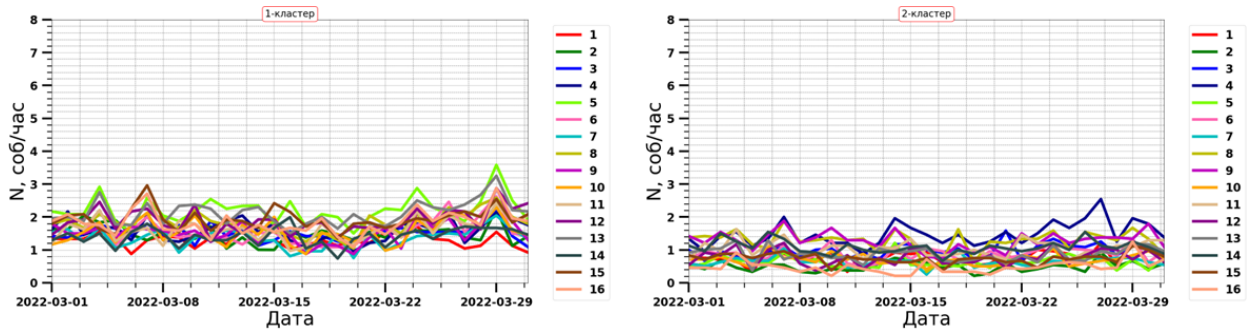


Рисунок 2.4 — Скорость счета событий  $Fr \geq 2, A_9 > 5$

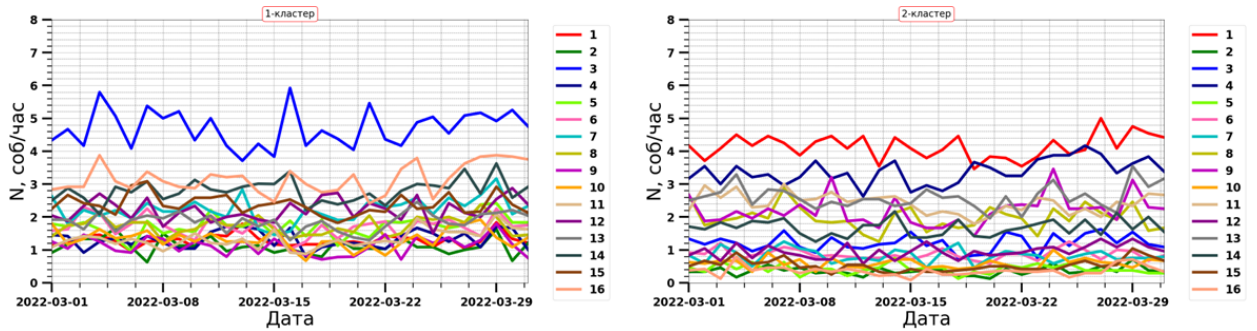


Рисунок 2.5 — Скорость счета событий  $Fr \geq 1, A_9 > 10$

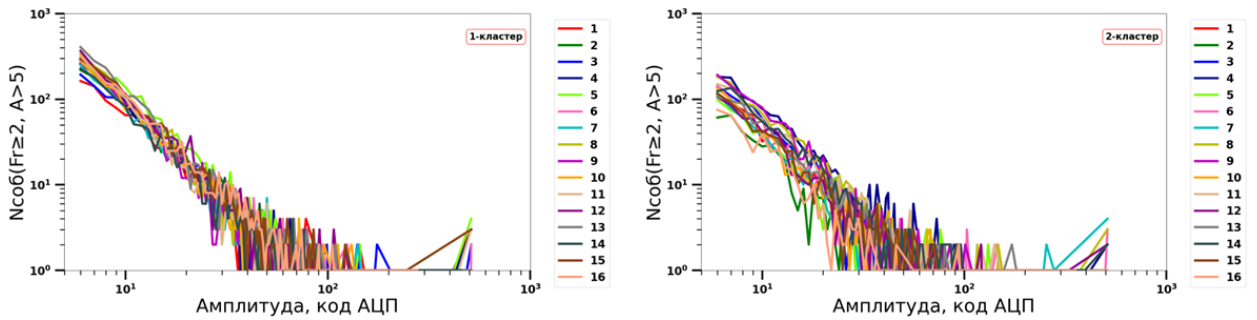


Рисунок 2.6 — Амплитудное распределение сигналов  $Fr \geq 2, A_9 > 5$



Таблица 2.1 — Сводная таблица времени работы установки с данными о реальном времени работы в часах и его отношении к календарному времени работы

№ кластера	Экспозиции, ч.	Календарное время, ч.	Экспозиция, %
1	737.75	768	96.1
2	768.00	768	100
1&2	737.75	768	96.1

Таблица 2.2 — Сводная таблица неисправностей установки ПРИЗМА-32 с данными о времени простоя, количестве поломок с их причинами и описанием

№ кластера	Время простоя		Кол-во потертанных минут	Примечание
	с	по		
1	2022-05-07 06:00	2022-05-07 08:15	135	Зависание ПО

Таблица 2.3 — Сводная таблица темпов счета событий и сигналов, отобранных как нейтрон кластеров установки ПРИЗМА-32

Счет/кластер	Кл1	Кл2
События ( $F_{\gamma} \geq 4$ , $A_{\gamma} \geq 5$ ), $N_{\text{соб.}/\text{ч}}$	3.65	1.64
Нейтроны, $N_n/\text{соб.}$	0.65	0.49

Таблица 2.4 – Значения среднемесячного числа срабатываний детекторов установки ПРИЗМА-32 и их стандартные отклонения

№	Стат-ка	№ детектора															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	mean(соб./ч.)	1.27	1.66	1.74	1.68	2.38	1.86	1.53	1.97	1.67	1.52	1.6	1.99	2.23	1.57	2.08	1.87
	std(соб./ч.)	0.22	0.23	0.23	0.26	0.25	0.26	0.22	0.25	0.27	0.28	0.31	0.36	0.34	0.23	0.33	0.3
2	mean(соб./ч.)	0.8	0.54	1.0	1.31	0.65	0.85	0.6	1.28	1.26	0.74	1.14	0.89	0.92	1.11	0.81	0.47
	std(соб./ч.)	0.22	0.14	0.19	0.26	0.18	0.23	0.17	0.22	0.18	0.18	0.21	0.2	0.21	0.24	0.16	0.12

Таблица 2.5 – Значения среднего числа нейтронов ( $N_n$ ) для детекторов установки ПРИЗМА-32 за месяц работы, нормированное на количество событий ( $N_s$ ) при самозапуске, и их стандартные отклонения

№	Стат-ка	№ детектора															
		n1	n2	n3	n4	n5	n6	n7	n8	n9	n10	n11	n12	n13	n14	n15	n16
1	mean(100/соб.)	0.04	0.04	0.08	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.07	0.04	0.04	0.04
	std(100/соб.)	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01
2	mean(100/соб.)	0.05	0.01	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.04	0.08	0.02	0.01
	std(100/соб.)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01

В итоге, пользователь получает полную информацию о работе установки за определенный период и может определить время нестабильной работы каждого детектора в 2-х кластерах ПРИЗМА-32.

## 2.2 НАСТРОЙКА ДЕТЕКТОРОВ

### 2.2.1 КРИТЕРИИ НАСТРОЙКИ

С помощью программы контроля работы установки были выявлены проблемные детекторы в 1-м и 2-м кластере. Детекторы считались проблемными, если:

- Число импульсов в событии, отобранных как нейтрон, при самозапуске менее  $0.005 \text{ соб}^{-1}$ .
- Число импульсов в событии, отобранных как нейтрон, при самозапуске более  $0.1 \text{ соб}^{-1}$ .
- Скорость счета событий с  $Fr \geq 2$ ,  $A_9 > 5$  код. АЦП от электромагнитной компоненты менее медианного значения скорости счета детекторов в кластере на  $1 \text{ соб./час}$ .
- Скорость счета событий с  $Fr \geq 2$ ,  $A_9 > 5$  код. АЦП от электромагнитной компоненты более медианного значения скорости счета детекторов в кластере на  $1.5 \text{ соб./час}$ .

Вышеперечисленные показатели отражают различные неисправности детектора. Завышенная скорость счета свидетельствует о чрезмерном напряжении в делителе ФЭУ. Завышенное число импульсов в событии, отобранных как нейтрон, может быть связано с плохими контактами проводов или неисправностью ФЭУ. Заниженная скорость счета событий может говорить о недостаточном напряжении в делителе ФЭУ.

Кроме данных справок о работе установки, предоставляемых ПО контроля ПРИЗМА-32, использовалась информация о показаниях темнового тока каждого детектора.

Темновым током является ток в цепи анода фотоэлектронного умножителя, полностью защищенного от воздействия света. Источниками темнового тока являются: термоэлектромагнитная эмиссия фотокатода, автоэлектромагнитная эмиссия из электродов, ток утечки в анодной цепи.

Темновой ток детекторов измеряется несколько раз в год для отслеживания динамики изменения у ФЭУ с повышенным значением данного параметра, так как он влияет на снижение скорости счета событий у детектора и снижение числа импульсов в событии, отобранных как нейтрон. Детектор считается проблемным, если уровень его темного тока превышает 1 мкА.

После выявления вышеперечисленных проблем у детекторов установки ПРИЗМА-32 на них производились ремонтные работы, результат которых демонстрируется программой контроля работы установки.

### 2.2.2 СТЕНД ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ФЭУ

В результате анализа полученных данных были выявлены детекторы, нуждающиеся в замене и подстройке ФЭУ. Если ФЭУ нуждалось в замене, то перед этим проводилось тестирование фотоэлектронного умножителя на стенде. В ходе тестирования измерялись: напряжение, подаваемое на детектирующий блок, чтобы ток на аноде ФЭУ был равен единому значению для всех детекторов в установке ПРИЗМА-32, и темновой ток ФЭУ.

Стенд для тестирования фотоэлектронных умножителей представляет собой корпус эн-детектора без сцинтиллятора. При тестировании в детектор помещается радиоактивный источник  $^{90}\text{St}$ , после чего нужно подать с HV-источника такое напряжение, чтобы ток на аноде ФЭУ был равен 3 мкА, то есть единому значению для всех детекторов в установке ПРИЗМА-32. Темновой ток измеряется микроамперметром с анода ФЭУ, когда найденное напряжение еще раз подается на детектирующий блок детектора, внутри которого уже нет радиоактивного источника.

Фотоэлектронный умножитель не допускается до использования в детекторе установки, если его темновой ток превышает 0.5 мкА или значение напряжения, подающегося на детектирующий блок, не соответствует промежутку возможных напряжений для заданного детектора.

Для проведения ремонтных работ на установке ПРИЗМА-32 было протестировано 35 ФЭУ, 8 из которых удовлетворяли условию отбора.

## 2.2.3 РЕМОНТНЫЕ РАБОТЫ

В ходе процедуры налаживания детекторов установки были проведены следующие ремонтные работы. Далее детекторы 1-го кластера — P1, детекторы 2-го кластера — P2.

Список проведенных работ на 1-м кластере:

- У всех детекторов с большим темновым током (P1-12, P1-02) заменены ФЭУ.
- На P1-01 заменены ФЭУ и разъемы, засчет чего были убраны шумы до настоящего (июнь 2022 г.) момента.
- На P1-05, P1-15, P1-12, P1-13 уменьшено напряжение питания делителя ФЭУ.
- На P1-09 заменен ФЭУ из-за того, что необходимое напряжение в делителе ФЭУ значительно превышало максимальное подаваемое установкой.
- На P1-01, P1-02, P1-03 увеличено напряжение питания делителя ФЭУ.

Результат проведенных ремонтных работ 1-го кластера, представлен на рисунках 2.7, 2.8 и 2.9. На рисунке 2.7 видно, что детектор P1-01 перестал превышать допустимый порог числа импульсов в событии, отобранных как нейтрон. В целом, детекторы стали реже превышать порог в  $0.1 \text{ соб}^{-1}$ . У 1-го кластера уменьшился промежуток, в котором находятся значения скорости счета событий с  $Fr \geq 2$ ,  $A_3 > 5$ , теперь промежуток от  $1 \text{ соб./час}$  до  $3 \text{ соб./час}$ .

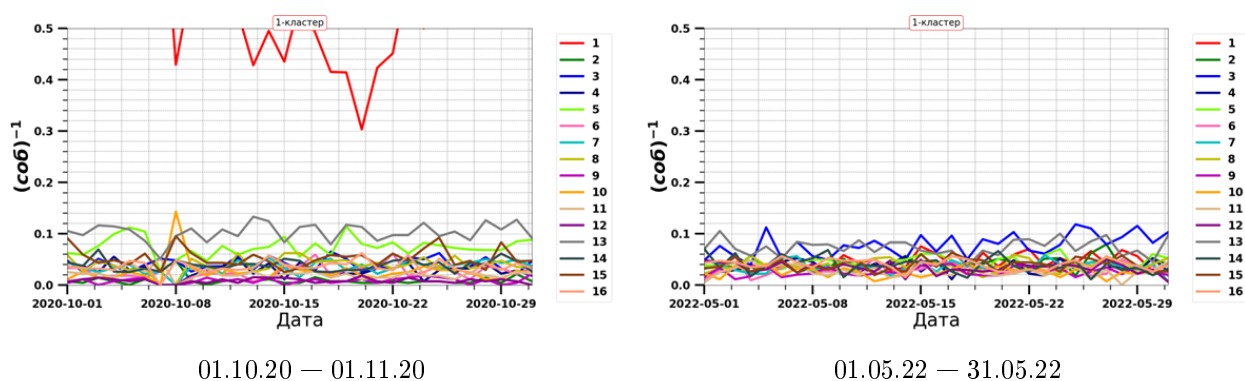


Рисунок 2.7 — Число импульсов в событии, отобранных как нейтрон, при самозапуске, 1-й кластер

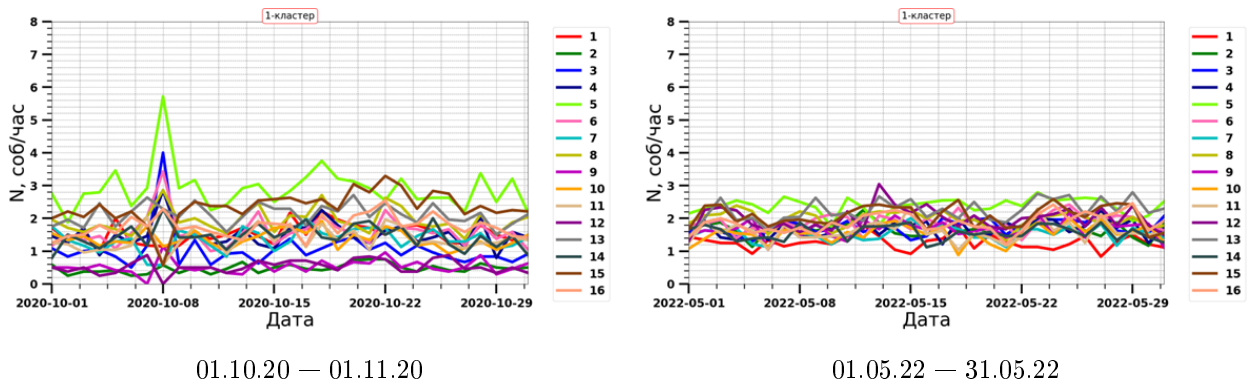


Рисунок 2.8 – Скорость счета событий с  $Fr \geq 2$ ,  $A_9 > 5$  у детекторов, 1-й кластер

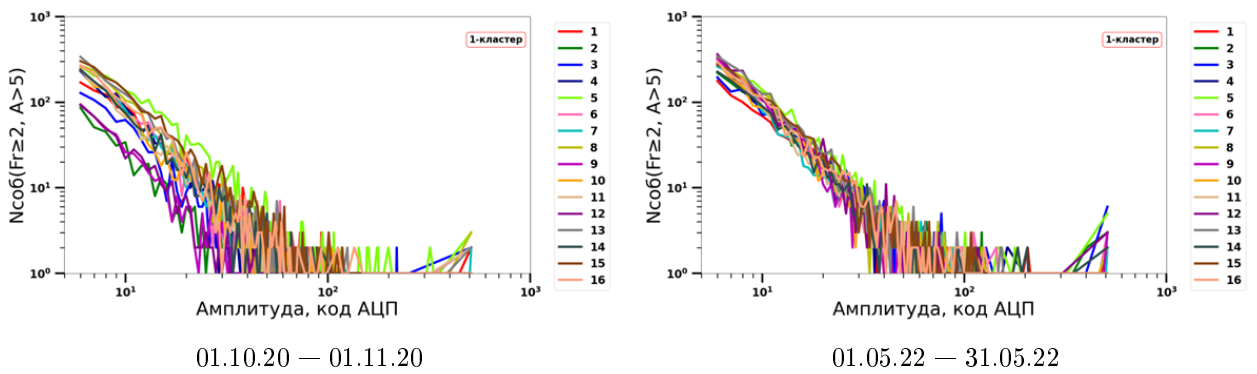


Рисунок 2.9 – Амплитудное распределение сигналов от событий с характеристиками электромагнитной компоненты  $Fr \geq 2$  и  $A_9 > 5$ , 1-й кластер

Как видно на рисунке 2.9, все детекторы 1-го кластера имеют подобное друг другу амплитудное распределение.

Информация о замене ФЭУ на 1-м кластере, представлены в табл. 2.6.

Таблица 2.6 – Замененные ФЭУ на 1-м кластере

Список замененных ФЭУ							
№ детектора	Номер ФЭУ до замены	Номер ФЭУ после замены	Дата замены	Темновой ток до замены, мА	Темновой ток после замены, мА (значение на момент 08.06.2022)	Напряжение до замены, В	Напряжение после замены, В
2	08/10 №503	15/11 №253	09.03.2021	9.750	0.001	1360	1490
12	08/10 №484	09/08 №260	09.03.2021	9.044	0.110	1315	1330
1	15/11 №241	03/11 №262	30.03.2021	0.029	0.016	1295	1329
9	08/07 №113	04/05 №203	14.07.2021	0.193	0.023	1635	1561

Список проведенных работ на 2-м кластере:

- У всех детекторов с большим темновым током (P2-01, P2-08, P2-14, P2-02) заменены ФЭУ.
- На P2-10 увеличено напряжение питания делителя ФЭУ.
- На P2-14, P2-08 уменьшено напряжение питания делителя ФЭУ.

Результат проведенных ремонтных работ детекторов 2-го кластера, представлен на рисунках 2.10, 2.11 и 2.12. На рисунке 2.10 видно, что из-за замены ФЭУ значение числа импульсов в событии, отобранных как нейтрон у P2-01, P2-08, P2-14, P2-02 поднялось, но не превышает порог в  $0.1 \text{ соб}^{-1}$ , кроме P2-14. У 2-го кластера за счет ремонтных работ изменился увеличился верхний и нижний пороги промежутка, в котором находятся значения скорости счета событий с  $Fr \geq 2$ ,  $A_3 > 5$ , теперь от  $0.3 \text{ соб./час}$  до  $1.6 \text{ соб./час}$ .

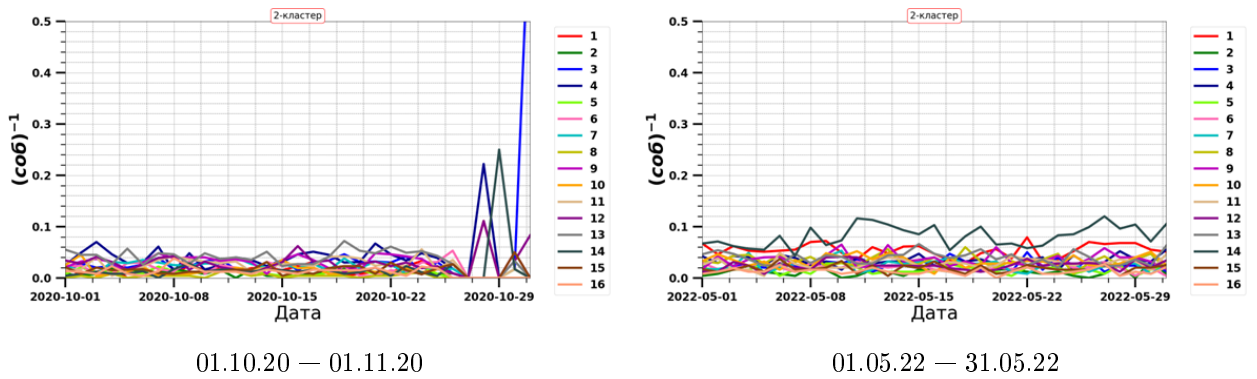


Рисунок 2.10 — Число импульсов в событии, отобранных как нейтрон, при самозапуске, 2-й кластер

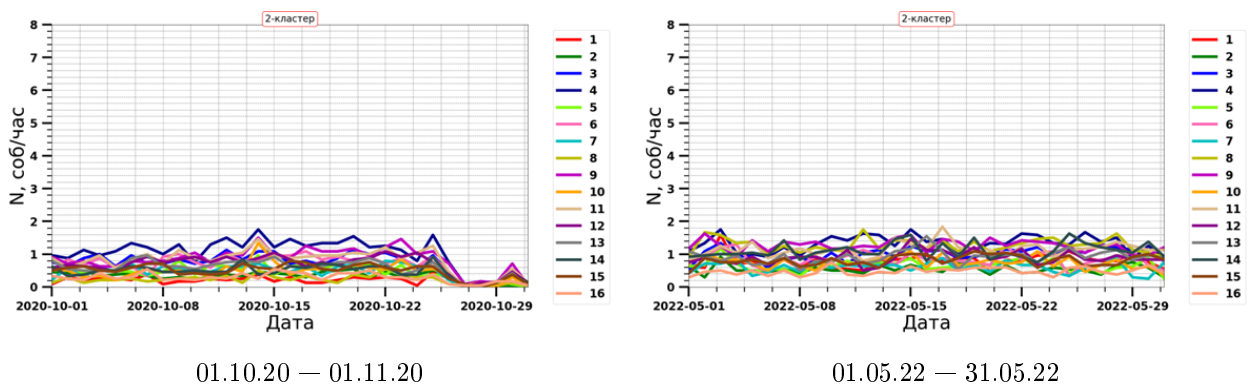


Рисунок 2.11 — Скорость счета событий с  $Fr \geq 2$ ,  $A_3 > 5$  у детекторов, 2-й кластер

Как видно на рисунке 2.12, все детекторы 2-го кластера имеют подобное друг другу амплитудное распределение, кроме P2-16, который нуждается в замене ФЭУ из-за высокого темного тока.

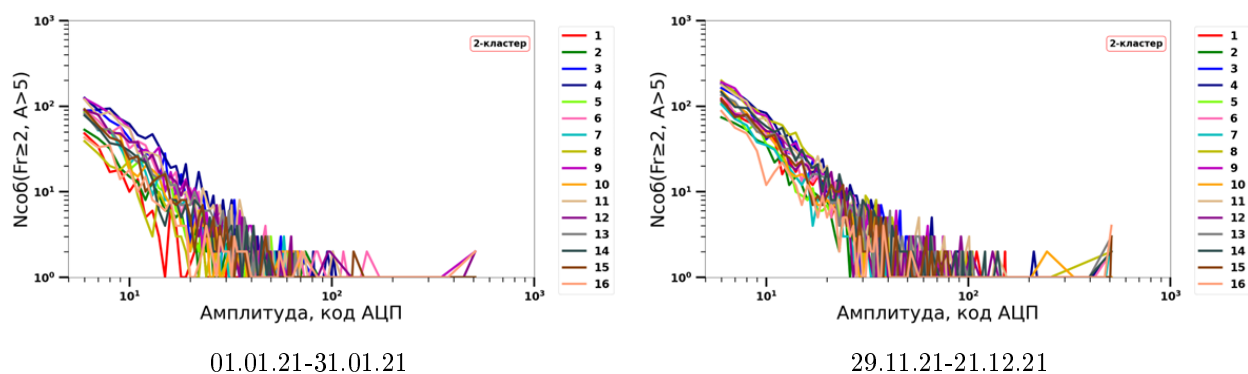


Рисунок 2.12 — Амплитудное распределение сигналов от событий с характеристиками электромагнитной компоненты  $Fr \geq 2$  и  $A_s > 5$ , 2-й кластер

Информация о замене ФЭУ на 2-м кластере, представлены в табл. 2.7.

Таблица 2.7 – Замененные ФЭУ на 2-м кластере

Список замененных ФЭУ							
№ детектора	Номер ФЭУ до замены	Номер ФЭУ после замены	Дата замены	Темновой ток до замены, мА	Темновой ток после замены, мА (значение на момент 08.06.2022)	Напряжение до замены, В	Напряжение после замены, В
8	08/05 №103	12/12 №017	30.03.2021	23.944	0.012	1321	1237
2	08/09 №317	08/08 №208	20.04.2021	33.282	0.331	1433	1433
14	02/09 №239	11/10 №155	20.04.2021	16.681	0.216	1505	1513
1	08/10 №540	15/11 №241	12.07.2021	12.456	0.015	1325	1285

Всего было заменено в ходе проведения ремонтных работ на установке 8 сборок с ФЭУ. Остальные фотоэлектронные умножители были отбракованы либо из-за большого темнового тока, либо из-за неподходящего напряжения. Изменения показаний темнового тока у каждого ФЭУ представлены в табл. 2.8

Таблица 2.8 – Изменения в темновом токе у каждого ФЭУ

№ дет.	Значение темнового тока (дата измерения), мкА					
	1-й кластер			2-й кластер		
	28.01. 2021	13.07. 2021	08.06. 2022	28.01. 2021	13.07. 2021	08.06. 2022
1	0.029	0.085	0.016	12.456	0.290	0.015
2	17.641	0.003	0.001	33.282	0.105	0.331
3	0.001	0.001	0.003	0.011	0.011	0.013
4	0.078	0.058	0.073	0.175	0.220	0.362
5	0.104	0.071	0.048	4.491	5.725	6.529
6	0.071	0.074	0.068	0.028	0.028	0.025
7	0.006	0.003	0.004	0.075	0.087	0.084
8	0.402	0.425	0.418	23.944	0.009	0.012
9	0.155	0.193	0.023	0.084	0.101	0.111
10	0.004	0.005	0.005	0.656	0.719	0.773
11	0.004	0.004	0.003	0.142	0.166	0.104
12	12.528	0.136	0.110	0.058	0.058	0.063
13	1.145	0.998	1.150	0.058	0.001	0.011
14	0.016	0.022	0.019	16.681	0.003	0.216
15	0.026	0.023	0.018	0.451	0.524	0.519
16	0.002	0.001	0.002	3.129	4.496	9.668

Исходя из данных таблицы 2.8 пятый и шестнадцатый детектор второго кластера и тринадцатый детектор первого кластера все еще нуждаются в замене фотоэлектронного умножителя, которая не было произведена из-за отсутствия запасных ФЭУ.



## 3 РАБОТА С ДАННЫМИ

Первичные данные установки ПРИЗМА-32 записываются в множество разрозненных файлов для 1-го и 2-го кластера, которые необходимо подготовить для дальнейшего анализа. Процесс подготовки информации включает в себя следующие процедуры:

- Приведение данных в более удобный формат, в основе которого стоит использование базы данных.
- Исключение данных нестабильно работающих детекторов и данных при перебоях работы установки.
- Разработка методики выделения событий при одновременном срабатывании двух кластеров.
- Получение коэффициентов пересчета амплитуд событий между информацией, представленной на 12-м и 7-м диноде, каждого детектора установки.

Для выполнения данных задач были приняты следующие решения:

- Спроектировать базу данных(БД) ПРИЗМА-32 с первичным ключом времени регистрации события, в которую автоматически заносилась бы следующая информация:
  - данные основных файлов ПРИЗМА-32;
  - данные 7-го динода ПРИЗМА-32;
  - данные о числе нейтронов, зарегистрированных в течение 20 мс после прихода ливня и об их временном распределении с шагом 100 мкс;
  - данные о событиях, зарегистрированных одновременно обоими кластерами;
  - данные о корректности работы детекторов в установке;
- Записать информацию о нестабильно работающих детекторах и перебоях работы установки в таблицу БД о корректности работы детекторов в установке. Для определения временных периодов перебоев и

проблемного функционирования детекторов использовать программное обеспечение для контроля работы ПРИЗМА-32, приведенное в главе 2.1.

- Разработать алгоритм, распознающий события зарегистрированные двумя кластерами или двумя динодами одновременно.
- Рассчитать коэффициенты пересчета амплитуд событий по данным, полученным в результате работы алгоритма, распознающего события при одновременном срабатывании двух динодов.

Преимущество базы данных заключается в том, что она может работать на сервере автономно, используя дополнительное программное обеспечение для автоматического заполнения экспериментальными данными ПРИЗМА-32. Пользователи могут запросом к базе данных получить нужную информацию для анализа. Кроме этого такая система хранения информации, как БД упрощает сопоставление данных установки ПРИЗМА-32 с данными других установок экспериментального комплекса НЕВОД.

Разработанная структура подготовки данных к обработке представлена на рисунке 3.1.

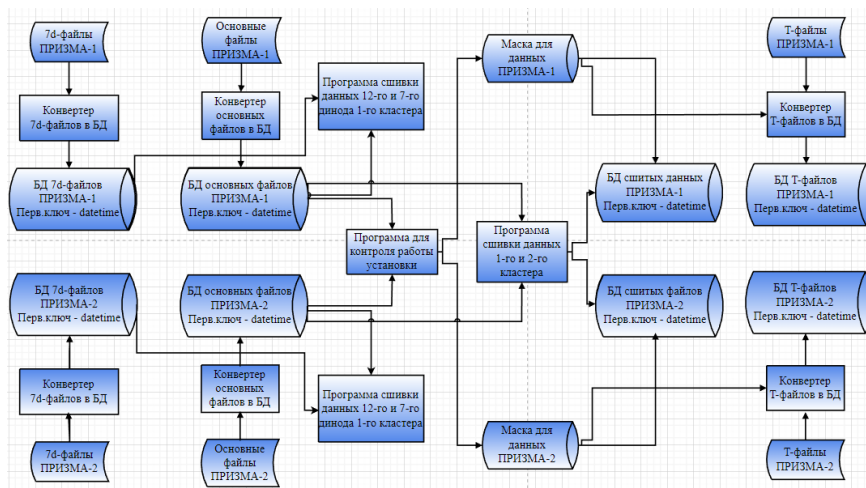


Рисунок 3.1 — Структура подготовки данных к анализу

### 3.1 БАЗА ДАННЫХ

В качестве объектно-реляционной системы управления базами данных был выбран PostgreSQL [28]. Таблицы создавались и заполнялись при помощи Python и его библиотеки SQLAlchemy [29], в которой применяет-

ся технология Object-Relational Mapping (ORM) связывающая базу данных с концепцией объектно-ориентированного языка программирования. В качестве программы для работы с PostgreSQL серверами используется pgAdmin 4.

Для заполнения каждой таблицы базы данных (БД) создавался конвертер на языке Python для преобразования первичных данных из файлов установки ПРИЗМА-32 в вид, подходящий для заполнения в ячейку таблицы БД.

Структура БД представлена на рисунке 3.2. В каждой таблице первичным ключом является время события, а связь между таблицами осуществляется отношением один-к-одному.

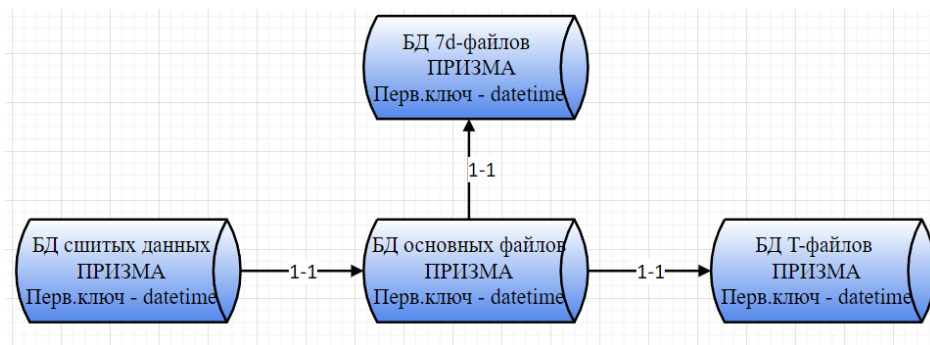


Рисунок 3.2 — Упрощенная структура базы данных

Далее представлены структуры таблиц БД ПРИЗМА-32:

- Структура таблицы файлов 12-го динода с основными параметрами зарегистрированных событий

Имя поля	Назначение	Тип данных
<i>datetime</i>	Дата и время регистрации события (уникальный идентификатор записи, первичный ключ)	DateTime
<i>trigger</i>	Вид условия, по которому квалифицируются события	Integer
<i>sum_n</i>	Суммарное количество нейтронов, зарегистрированных кластером за одно событие	Integer
<i>Amp(i)</i> <i>i=1..16</i>	Энерговыведение от электромагнитной компоненты ШАЛ в одном детекторе	Integer
<i>Nn(i)</i> <i>i=1..16</i>	Число зарегистрированных нейтронов за 20 мс в одном детекторе	Integer

- Структура таблицы файлов, содержащих данные о времени регистрации нейтронов после прихода ШАЛ

Имя поля	Назначение	Тип данных
<b>datetime</b>	Дата и время регистрации события (уникальный идентификатор записи, первичный ключ)	DateTime
<b>trigger</b>	Вид условия, по которому квалифицируется событие	Integer
<b>sum_n</b>	Суммарное количество нейтронов, зарегистрированных кластером за одно событие	Integer
<b>time_delay</b>	Список с временем запаздывания для каждого зарегистрированного нейтрона	Text
<b>detector</b>	Список с номерами детекторов, зарегистрировавших нейтроны в событии	Text
<b>n_per_registration</b>	Список количества нейтронов, зарегистрированных детектором за один шаг в 100 мкс	Text

- Структура таблицы файлов 7-го динода с основными параметрами зарегистрированных событий

Имя поля	Назначение	Тип данных
<b>datetime</b>	Дата и время регистрации события (уникальный идентификатор записи, первичный ключ)	DateTime
<b>trigger</b>	Вид условия, по которому квалифицируется событие	Integer
<b>Amp(i) i=1..16</b>	Энерговыведение от электромагнитной компоненты ШАЛ в одном детекторе	Integer

- Структура таблицы с данными о корректности работы детекторов в установке

Имя поля	Назначение	Тип данных
<b>date</b>	Дата работы установки (уникальный идентификатор записи, первичный ключ)	Date
<b>Amp{i}- mask</b>	Число, описывающее состояние детектора при регистрации энерговыведения от электромагнитной компоненты ШАЛ. 1 – функционирует правильно, 0-не функционирует, либо функционирует неправильно	Integer
<b>N{i}- mask</b>	Число, описывающее состояние детектора при регистрации нейтронов. 1 – функционирует правильно, 0-не функционирует, либо функционирует неправильно	Integer

## 3.2 КОРРЕКТНОСТЬ РАБОТЫ ДЕТЕКТОРОВ В УСТАНОВКЕ

Для записи временных периодов нестабильной работы детекторов была создана таблица с данными о корректности работы детекторов установки ПРИЗМА-32. Она представляет собой бинарную оценку возможности брать данные детектора по нейтронам или по амплитудам для анализа.

Для оценки данной возможности используются результаты программного обеспечения для контроля работы установки:

Для ПРИЗМА-32 существует два вида оценки корректности работы детекторов: по нейтронам и по заряженным частицам.

Корректность по нейтронам определяется из числа импульсов в событии, отобранных, как нейтрон, при самозапуске кластера, то есть при нулевом триггере, срабатывающем раз в 5 минут для определения уровня фона случайных совпадений. Этот параметр ключевой для распределения времени запаздывания тепловых нейтронов. Он является нейтронным фоном, состоящим из естественного фона нейтронов и шумов фотоэлектронного умножителя.

До обработки не допускаются нейтронные данные детектора, если у него число импульсов, отобранных как нейтрон, при самозапуске превышает одну десятую шумового импульса на событие.

В качестве примера приведены два графика числа импульсов в событии, отобранных, как нейтрон, при самозапуске второго кластера за 2015 г. Один из них построен до фильтрации данных, он представлен на рисунке 3.3. Второй построен с учетом фильтрации, он представлен на рисунке 3.4

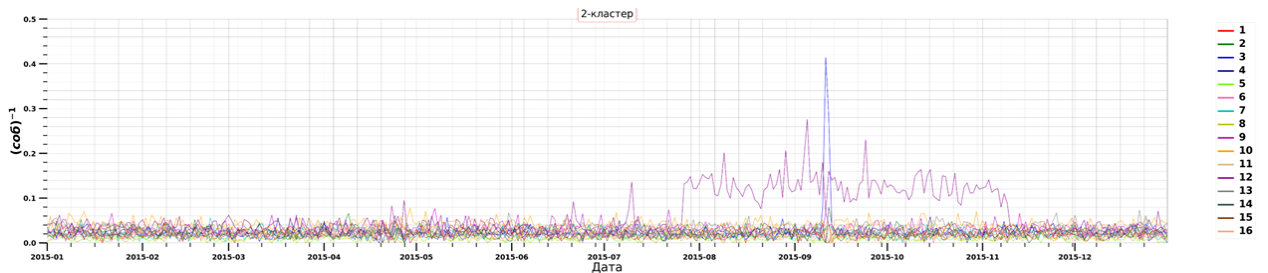


Рисунок 3.3 — График числа импульсов в событии, отобранных, как нейтрон, при самозапуске второго кластера за 2015 г. до фильтрации данных

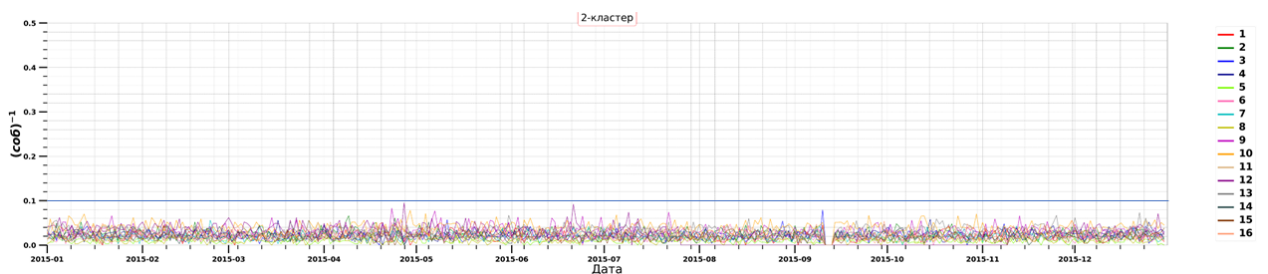


Рисунок 3.4 — График числа импульсов в событии, отобранных, как нейтрон, при самозапуске второго кластера за 2015 г. после фильтрации данных

Корректность по амплитудам определяется из скорости счета событий с  $Fr \geq 2$ ,  $A_3 > 5$  и скорости счета событий с  $Fr \geq 1$ ,  $A_3 > 10$ .

Критерий для недопуска амплитудных данных детектора до обработки — скорость счета событий с  $Fr \geq 2$ ,  $A_9 > 5$  код. АЦП от электромагнитной компоненты менее медианного значения на 1 соб./час или более на 1.5 соб./час.

В качестве примера приведены два графика скорости счета событий с  $Fr \geq 1$ ,  $A_9 > 10$  у детекторов первого кластера за 2017 г. Один из них построен до фильтрации данных, он представлен на рисунке 3.5. Второй построен с учетом фильтрации, он представлен на рисунке 3.6

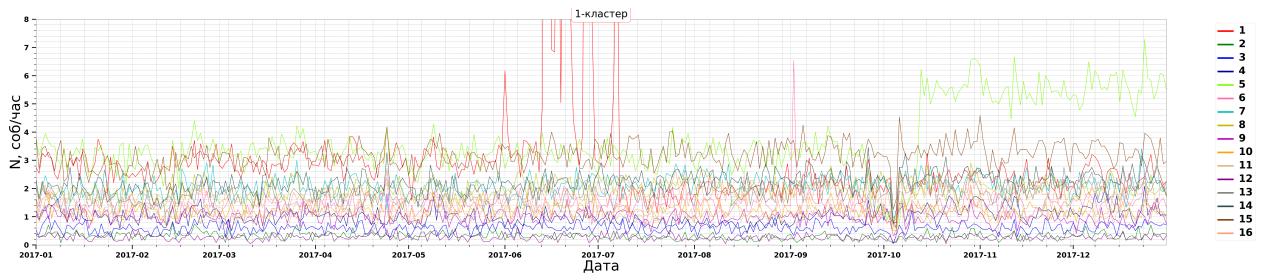


Рисунок 3.5 — Скорость счета событий с  $Fr \geq 1$ ,  $A_9 > 10$  у детекторов первого кластера за 2017 г. до фильтрации данных

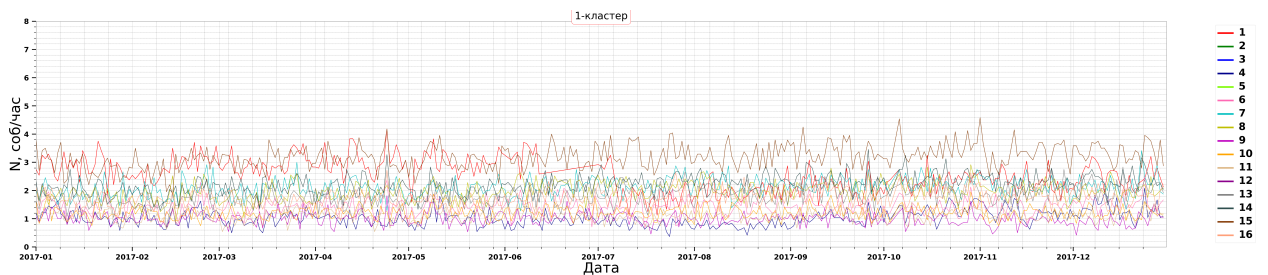


Рисунок 3.6 — Скорость счета событий с  $Fr \geq 1$ ,  $A_9 > 10$  у детекторов первого кластера за 2017 г. после фильтрации данных

Основываясь на полученных данных о корректности работы детекторов были построены таблицы 3.1 – 3.4 суммарного количества исключенных дней, в которых детектор был признан нестабильным, в промежутке между 1 февраля 2012 г. и 31 декабря 2021 г. (3622 дня)

Таблица 3.1 — Число исключенных дней из-за фильтрации по амплитудам на детекторах первого кластера

Детектор	Кол-во исключенных дней	Доля исключенных дней, %
1	571	15.76%
2	2473	68.28%
3	1708	47.16%
4	85	2.35%
5	3112	85.92%
6	142	3.92%
7	55	1.52%
8	70	1.93%
9	1160	32.03%
10	74	2.04%
11	52	1.44%
12	2166	59.80%
13	64	1.77%
14	248	6.85%
15	173	4.78%
16	67	1.66%

Таблица 3.2 — Число исключенных дней из-за фильтрации по нейтронам на детекторах первого кластера

Детектор	Кол-во исключенных дней	Доля исключенных дней, %
1	2342	64.67%
2	25	0.69%
3	11	0.30%
4	10	0.28%
5	655	18.08%
6	10	0.28%
7	12	0.33%
8	9	0.25%
9	9	0.25%
10	8	0.22%
11	8	0.22%
12	11	0.30%
13	388	10.71%
14	19	0.52%
15	14	0.39%
16	11	0.30%

Таблица 3.3 — Число исключенных дней из-за фильтрации по амплитудам на детекторах второго кластера

Детектор	Кол-во исключенных дней	Доля исключенных дней, %
1	2330	63.62%
2	606	16.73%
3	101	2.78%
4	94	2.60%
5	1338	36.94%
6	60	1.66%
7	103	2.84%
8	1453	40.12%
9	134	3.70%
10	403	11.12%
11	55	1.52%
12	480	13.25%
13	94	2.60%
14	171	4.72%
15	105	2.90%
16	550	15.18%

Таблица 3.4 — Число исключенных дней из-за фильтрации по нейтронам на детекторах первого кластера

Детектор	Кол-во исключенных дней	Доля исключенных дней, %
1	50	1.38%
2	17	0.47%
3	18	0.50%
4	17	0.47%
5	20	0.55%
6	17	0.47%
7	17	0.47%
8	65	1.80%
9	25	0.69%
10	17	0.47%
11	17	0.47%
12	124	3.42%
13	17	0.47%
14	140	3.87%
15	17	0.47%
16	17	0.47%



### 3.3 ОБЪЕДИНЕНИЕ СОБЫТИЙ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ ОДНОВРЕМЕННО ДВУМЯ КЛАСТЕРАМИ ИЛИ ДВУМЯ ДИНОДАМИ

Для возможности обработки событий, зарегистрированных одновременно двумя кластерами или двумя динодами установки ПРИЗМА-32, был создан алгоритм сшивки данных, распознающий такие события. Критерий отбора событий для алгоритма:

- Для кластеров — кратность срабатывания детекторов на одном кластере  $\geq 4$  и  $A_9 > 5$  код. АЦП.
- Для динодов — у двенадцатого динода кратность срабатывания детекторов на одном кластере  $\geq 4$  и  $A_9 > 10$  код. АЦП.

Алгоритм написан на языке Python, использовались библиотеки: Datetime, Pandas, SQLAlchemy.

С помощью библиотеки SQLAlchemy берутся нужные данные из БД ПРИЗМА-32, которые с помощью информации из таблицы о корректности работы установки проходят фильтрацию.

Для алгоритма сшивки данных необходимы временные ворота ( $\Delta t$ ), в которых будут совмещаться зарегистрированные события с двух кластеров, подходящие под критерии отбора. Для определения временных ворот было построено с помощью библиотеки Matplotlib распределения разницы времен срабатывания кластеров, представленное на рисунке 3.7 и динодов, представленное на рисунке 3.8а для 1-го кластера и 3.8б для 2-го кластера.

При построении данного распределения, чтобы ускорить работу алгоритма лучше задать верхний предел ( $\Delta t_{max}$ ) поиска временных ворот, в алгоритме  $\Delta t_{max} = 1$  с.

Исходя из обработанных за 2012 — 2021 гг. данных  $\Delta t$  для событий, зарегистрированных двумя кластерами, был принят равным 80 мс, а для событий, зарегистрированных двумя динодами,  $\Delta t = 60$  мс на 1-м кластере и  $\Delta t = 80$  мс на 2-м кластере. Но на обоих кластерах установки максимум распределения событий, зарегистрированных двумя динодами, находится не в нуле, а в -30 мс.

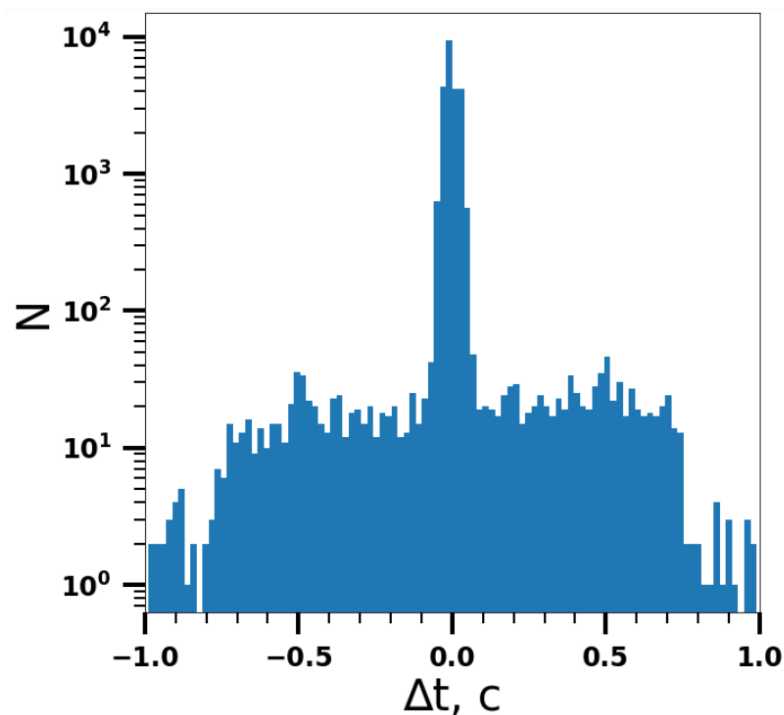


Рисунок 3.7 — Распределение разницы времени регистрации события двумя кластерами

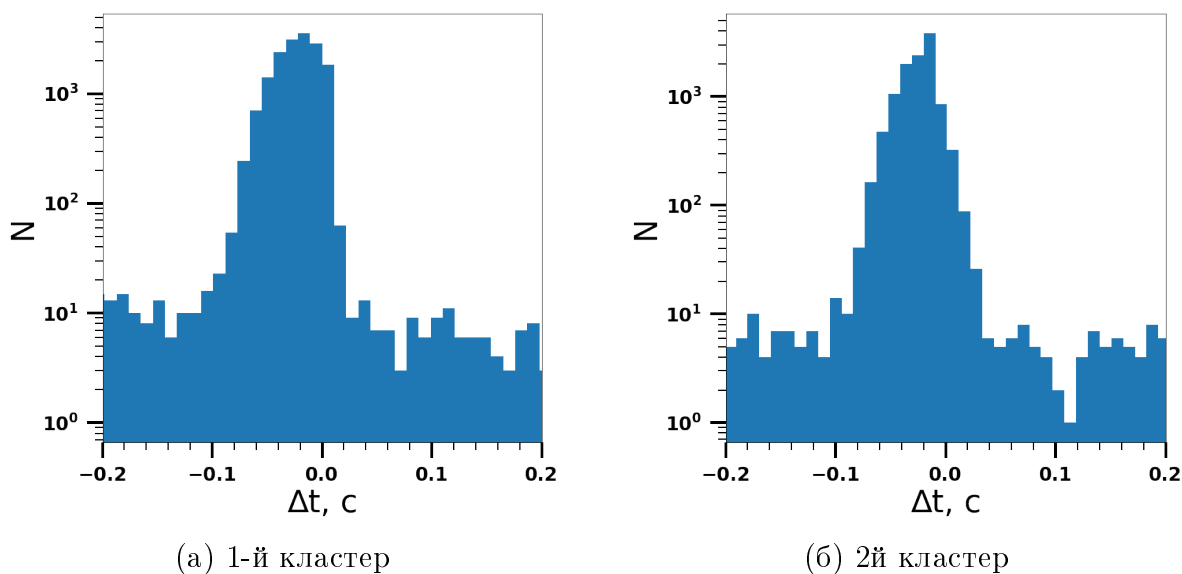


Рисунок 3.8 — Распределение разницы времени регистрации события двумя динодами

Далее происходит сопоставление событий двух кластеров (двух динодов), удовлетворяющих критериям отбора, в пределах времени регистрации, установленного временными воротами. В алгоритме сшивке данных это было реализовано с помощью библиотеки Pandas и ее условий, которые можно наложить на DataFrame, чтобы получить события, зарегистри-

рованные между временными воротами. Кроме того, для сложения времени события с границами временных ворот использовалась библиотека Datetime, упрощающая арифметические операции с временем.

За 2012 – 2021 гг. сшитых алгоритмом событий с одновременной регистрацией:

- Двумя кластерами – 24754. На рисунке 3.9 представлено распределение таких событий по временной оси.
- Двумя динодами – 27713. 1-й кластер - 16407. 2-й кластер - 11306.

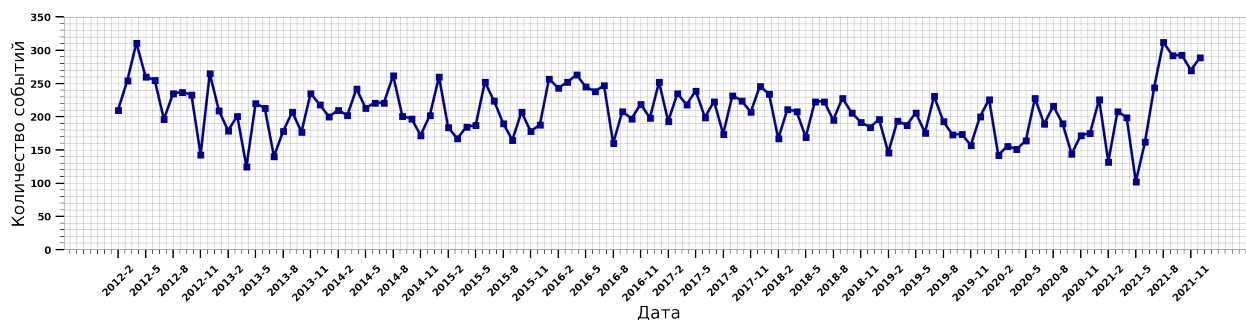


Рисунок 3.9 — Распределение событий с одновременной регистрацией двумя кластерами по временной оси

Для проверки работоспособности алгоритма сшивки был создан скрипт, создающий для каждого общего события с одновременной регистрацией двумя кластерами, у которого  $A_э > 100$  код. АЦП хотя бы на одном детекторе график с показаниями детекторов по нейтронам и по амплитудам, пример которого представлен на рисунке 3.10. По данному графику можно оценить целостность регистрации двумя кластерами фронта широкого атмосферного ливня.

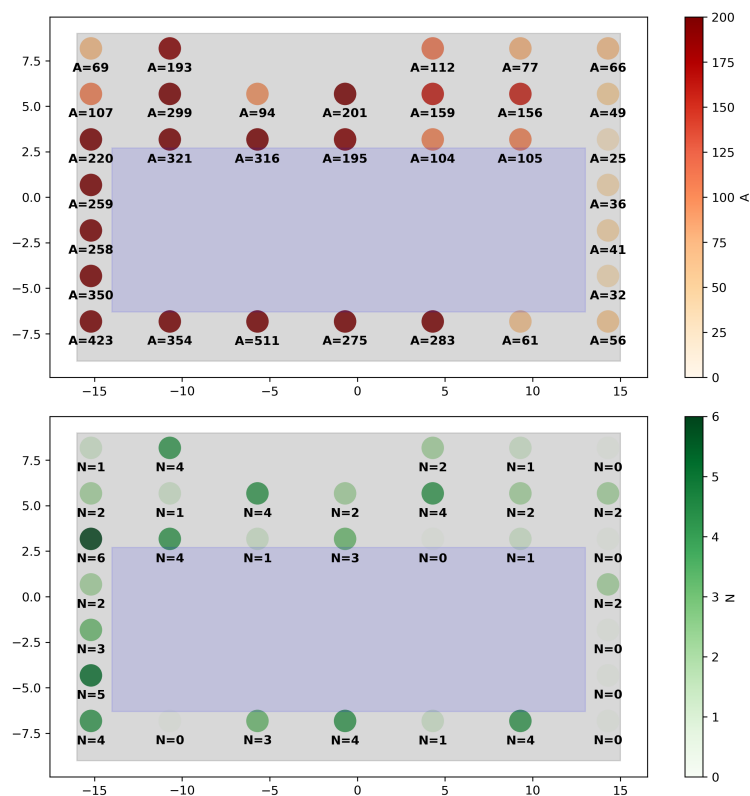


Рисунок 3.10 — Пример регистрации события одновременно в двух кластерах: заряженные частицы (сверху) и нейтроны (снизу)

### 3.4 ДАННЫЕ 7-ГО ДИНОДА

Седьмой динод установки ПРИЗМА-32 имеет коэффициент усиления в 60 — 80 раз меньше, а значит позволяет существенно расширить диапазон энергий регистрируемых широких атмосферных ливней. Пользуясь алгоритмом, описанным ранее, были выделены события при одновременном срабатывании двух динодов. Получены 16407 событий на первом кластере и 11306 на втором.

Были рассчитаны средние коэффициенты пересчета амплитуды событий за весь период времени работы установки между информацией, которая содержится на 12-м и 7-м диноде, представленные в таблице 3.5 и 3.6. Для расчета коэффициентов пересчета был введен дополнительный критерий отбора для сшитых событий 12-го динода —  $A_9 > 200$  хотя бы на двух детекторах, но при этом  $A_9$  должна быть меньше 511 кодов АЦП, чтобы не рассматривать зашкаливающие детекторы, коэффициенты которых могут быть меньше ожидаемых.

Таблица 3.5 — Таблица коэффициентов пересчета между 12-м и 7-м динодом, 1-й кластер

Детектор	Коэффициент пересчета
1	—
2	—
3	—
4	—
5	—
6	—
7	$16.47 \pm 2.50$
8	$9.25 \pm 1.96$
9	—
10	—
11	—
12	$13.44 \pm 3.65$
13	$25.25 \pm 4.76$
14	$18.19 \pm 4.35$
15	$17.35 \pm 4.18$
16	$20.41 \pm 3.91$

Таблица 3.6 — Таблица коэффициентов пересчета между 12-м и 7-м динодом, 2-й кластер

Детектор	Коэффициент пересчета
1	$11.23 \pm 2.74$
2	$15.80 \pm 5.11$
3	$10.82 \pm 1.99$
4	$15.46 \pm 3.16$
5	$24.64 \pm 4.45$
6	$18.14 \pm 4.64$
7	$16.52 \pm 2.64$
8	$11.69 \pm 5.87$
9	$22.50 \pm 3.63$
10	$13.89 \pm 1.59$
11	$11.07 \pm 2.14$
12	$27.01 \pm 5.29$
13	$24.97 \pm 5.77$
14	$10.48 \pm 2.76$
15	$11.67 \pm 2.19$
16	—

Выяснилось, что седьмой динод не работал на девяти детекторах первого кластера, начиная с 2014 г. и не работал на шестнадцатом детекторе второго кластера, поэтому на данном этапе работ было принято решение отказаться от данных седьмого динода.

## 4 ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ УСТАНОВКИ ПРИЗМА-32

Используя, созданную таблицу БД ПРИЗМА-32 о корректности работы установки был профильтрован массив экспериментальных данных ПРИЗМА-32 за период с февраля 2012 г. по декабрь 2021 г. В подготовленных данных стабильно работающих детекторов были отобраны события по критерию отбора —  $A_3 > 5$  хотя бы на четырех детекторах. Таких событий было зарегистрировано:

- Первым кластером — 125516.
- Вторым кластером — 68891.
- Одновременно двумя кластерами (1&2) — 24754.

Нейтронов в событиях заданным критерием отбора, зарегистрировано:

- Первым кластером — 298621.
- Вторым кластером — 210537.
- Одновременно двумя кластерами (1&2) — 207037.

Произведен анализ отобранных по приведенному критерию событий, в процессе которого были исследованы:

- Временное распределение тепловых нейтронов.
- Спектр энерговыделения широкого атмосферного ливня.
- Дифференциальный и интегральный спектры по числу нейтронов.

### 4.1 ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НЕЙТРОНОВ

Для каждого детектора установки ПРИЗМА-32 были построены графики временного распределения тепловых нейтронов, представленные в приложении А. На оси абсцисс у графика — время запаздывания тепловых нейтронов в секундах. На оси ординат — нормированное на общее число

событий, отобранных по приведенному критерию, количество совпадений тепловых нейтронов с равным параметром времени запаздывания.

Полученные распределения можно описать функцией:

$$y(t) = A_1 \cdot e^{-t/t_1} + A_2 \cdot e^{-t/t_2} + y_0 \quad (4.1)$$

Параметр  $t_1$  связан со средним временем жизни локально рожденных нейтронов, а  $t_2$  – со средним временем жизни нейтронов, образовавшихся в крыше [18].  $t_1$  и  $t_2$  для каждого детектора установки, представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 — Параметры временного распределения нейтронов для детекторов установки ПРИЗМА-32

Детектор	1-й кластер		2-й кластер	
	$t_1$ , мс	$t_2$ , мс	$t_1$ , мс	$t_2$ , мс
1	$0.70 \pm 0.04$	$4.39 \pm 0.45$	$0.44 \pm 0.01$	$2.88 \pm 0.19$
2	$0.53 \pm 0.02$	$4.27 \pm 0.22$	$0.47 \pm 0.01$	$2.97 \pm 0.19$
3	$0.56 \pm 0.01$	$3.31 \pm 0.20$	$0.51 \pm 0.01$	$3.22 \pm 0.16$
4	$0.63 \pm 0.03$	$5.13 \pm 0.26$	$0.48 \pm 0.01$	$2.19 \pm 0.16$
5	$0.36 \pm 0.02$	$4.73 \pm 0.14$	$0.58 \pm 0.01$	$2.55 \pm 0.36$
6	$0.65 \pm 0.02$	$4.14 \pm 0.30$	$0.60 \pm 0.01$	$3.75 \pm 0.58$
7	$0.59 \pm 0.01$	$3.57 \pm 0.21$	$0.60 \pm 0.01$	$3.07 \pm 0.24$
8	$0.51 \pm 0.01$	$3.45 \pm 0.18$	$0.48 \pm 0.02$	$2.40 \pm 0.19$
9	$0.45 \pm 0.01$	$3.19 \pm 0.13$	$0.48 \pm 0.01$	$3.20 \pm 0.20$
10	$0.28 \pm 0.01$	$4.32 \pm 0.23$	$0.49 \pm 0.01$	$3.56 \pm 0.19$
11	$0.47 \pm 0.01$	$3.96 \pm 0.24$	$0.45 \pm 0.01$	$2.82 \pm 0.13$
12	$0.56 \pm 0.01$	$3.83 \pm 0.27$	$0.46 \pm 0.01$	$2.05 \pm 0.08$
13	$0.52 \pm 0.01$	$4.68 \pm 0.32$	$0.42 \pm 0.02$	$1.51 \pm 0.08$
14	$0.41 \pm 0.01$	$2.87 \pm 0.10$	$0.59 \pm 0.01$	$2.95 \pm 0.28$
15	$0.37 \pm 0.01$	$2.97 \pm 0.10$	$0.64 \pm 0.01$	$2.55 \pm 0.52$
16	$0.43 \pm 0.01$	$3.62 \pm 0.13$	$0.68 \pm 0.01$	$3.47 \pm 0.37$

Также были построены графики временного распределения тепловых нейтронов для каждого кластера установки ПРИЗМА-32 и для событий, зарегистрированных одновременно двумя кластерами, представленные на рисунках 4.1 — 4.3.



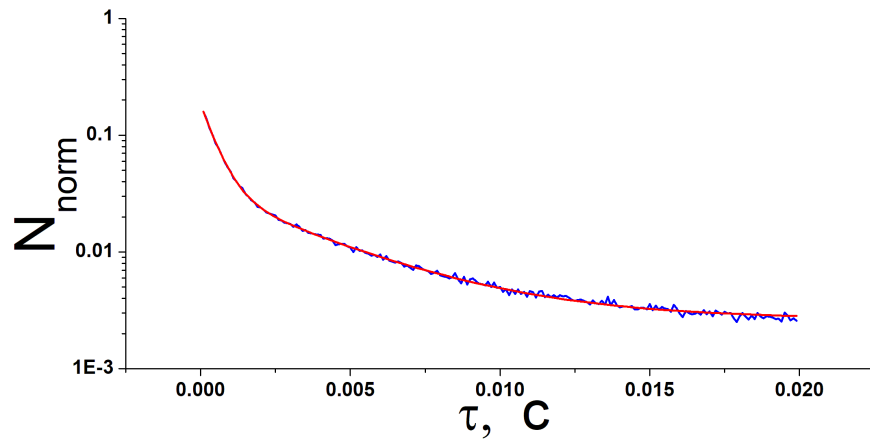


Рисунок 4.1 — Временное распределение нейтронов на 1-м кластере

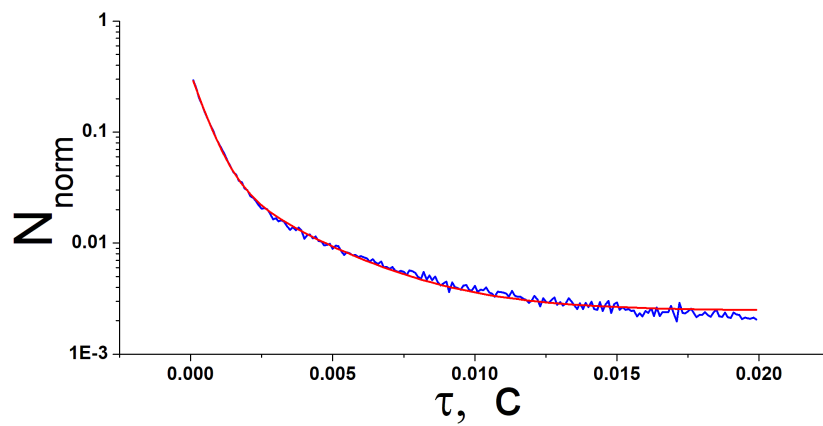


Рисунок 4.2 — Временное распределение нейтронов на 2-м кластере

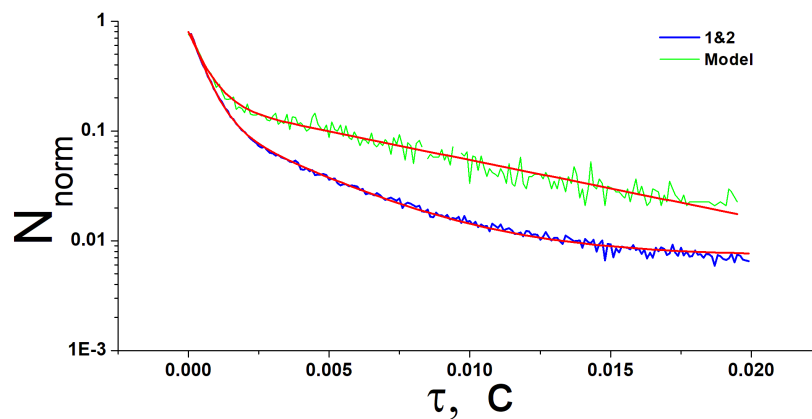


Рисунок 4.3 — Временное распределение нейтронов при регистрации одновременно двумя кластерами

Параметры  $t_1$  и  $t_2$ :

- Для 1-го кластера  $t_1 = 0.51 \pm 0.01$  мс и  $t_2 = 3.78 \pm 0.06$  мс.
- Для 2-го кластера  $t_1 = 0.53 \pm 0.01$  мс и  $t_2 = 2.78 \pm 0.09$  мс.
- Для 1&2  $t_1 = 0.53 \pm 0.01$  мс и  $t_2 = 3.43 \pm 0.07$  мс.

Результаты временного распределения тепловых нейтронов в ШАЛ, полученные за 2012 — 2021 гг., имеют хорошее согласие с результатами обработки данных временных распределений, полученных ранее. Оба параметра согласуются с временными распределениями по экспериментальным данным за 2013 — 2014 гг., представленными в [30]. Параметр  $t_1$  хорошо согласуется с теоретической моделью установки ПРИЗМА-32, представленной в [31]. Различия по параметру  $t_2$  могут объясняться более жесткими критериями отбора в модели (минимум 4 нейтрона должны быть зарегистрированы кластером) или тем, что в модели отсутствуют конструкции внутри 4-го этажа экспериментального комплекса НЕВОД.

## 4.2 СПЕКТР ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ШАЛ

Для каждого кластера установки ПРИЗМА-32 и для событий, зарегистрированных одновременно двумя кластерами были построены спектры энерговыделения ШАЛ за 2012 — 2021 гг, представленные на рисунках 4.4, 4.5 и 4.6. На оси абсцисс — прологарифмированное суммарное энерговыделение детекторов с двенадцатого динода, зарегистрированное детекторами за одно событие. На оси ординат — количество совпадений суммарного энерговыделения в логарифмическом шаге — 0.1.

При построении спектра каждое суммарное энерговыделение было умножено на коэффициент равный общему числу детекторов, использованных при суммировании энерговыделения, деленному на число стабильно работающих детекторов.

Также на спектре отображен показатель количества детекторов, находящихся вне диапазона измерений ( $A_3 = 511$  код. АЦП) в одном событии, под каждой точкой, кроме тех, у кого он равен нулю. Для фитирования спектров не брались точки, у которых этот показатель превышает  $0.4_{\text{дет./соб.}}$ .

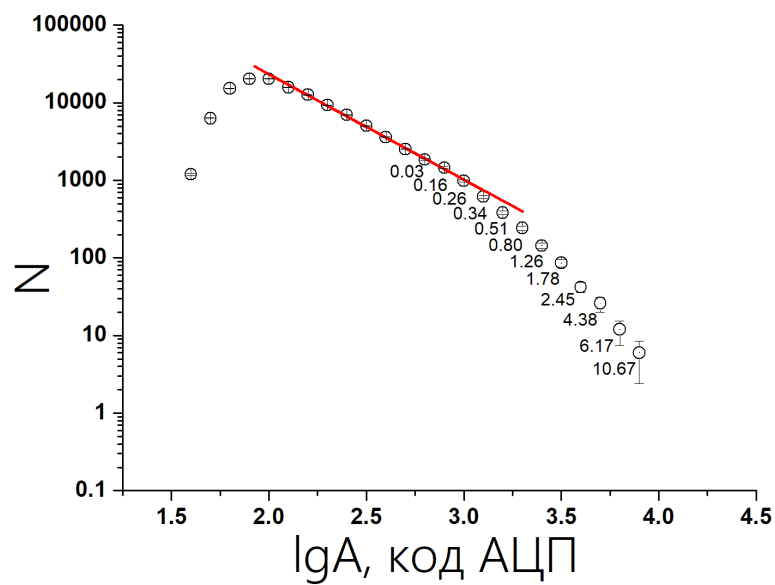


Рисунок 4.4 — Спектр энерговыделения ШАЛ, 1-й кластер

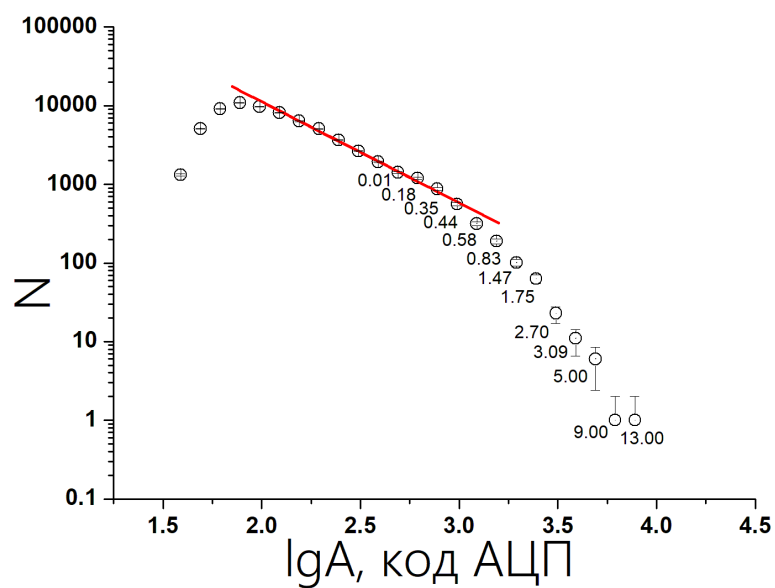


Рисунок 4.5 — Спектр энерговыделения ШАЛ, 2-й кластер

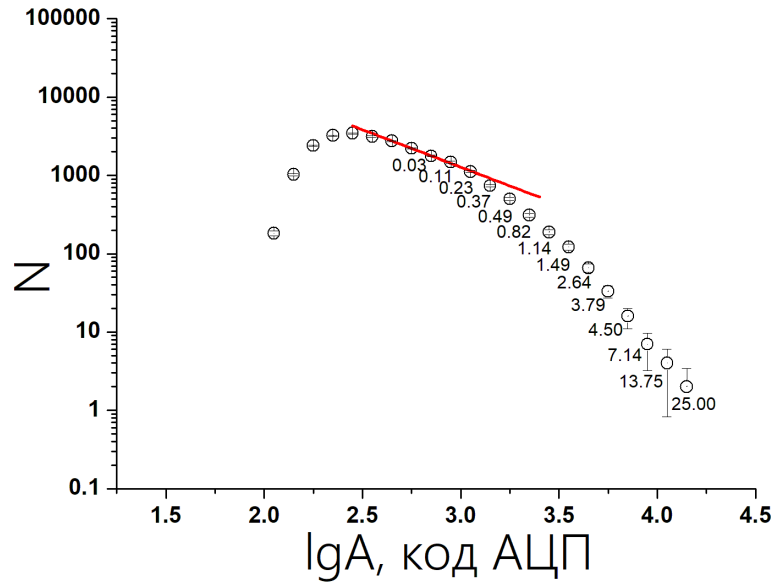


Рисунок 4.6 — Спектр энерговыделения ШАЛ при регистрации одновременно двумя кластерами

Показатель наклона спектра энерговыделений по заряженной компоненте(K):

- Для 1-го кластера  $K = -1.36 \pm 0.02$ .
- Для 2-го кластера  $K = -1.28 \pm 0.03$ .
- Для 1&2  $K = -1.15 \pm 0.03$ .

Полученные показатели наклона меньше, чем наклоны спектров, полученных на других установках(-1.5 ÷ -1.6) и в работе [32]. Такой результат можно объяснить тем, что в спектре присутствуют данные с откликом от регистрации заряженных частиц большим, чем предел измерения АЦП (1 В), что приводит к занижению отклика установки по заряженным частицам при больших энерговыделениях. Помимо этого на спектр влияют критерии отбора, выбранные в данной работе.

### 4.3 СПЕКТР ПО ЧИСЛУ НЕЙТРОНОВ

Для каждого кластера установки ПРИЗМА-32 и для событий, зарегистрированных одновременно двумя кластерами были построены дифференциальные спектры по числу нейтронов, представленные на рисунках 4.7, 4.8 и 4.9, и интегральные, представленные на рисунках 4.10, 4.11 и

4.12. На оси абсцисс — прологарифмированное суммарное число нейтронов, зарегистрированных детекторами за одно событие. На оси ординат у дифференциального спектра — количество совпадений суммарного числа нейтронов в определенном логарифмическом шаге — 0.1, а у интегрального — количество совпадений суммарного числа нейтронов превышает или равно заданному на оси абсцисс значению в определенном логарифмическом шаге — 0.1,

При построении спектров каждое суммарное число нейтронов аналогично суммарному энерговыделению было умножено на коэффициент равный общему числу детекторов, использованных при суммировании числа нейтронов, деленному на число стабильно работающих детекторов.

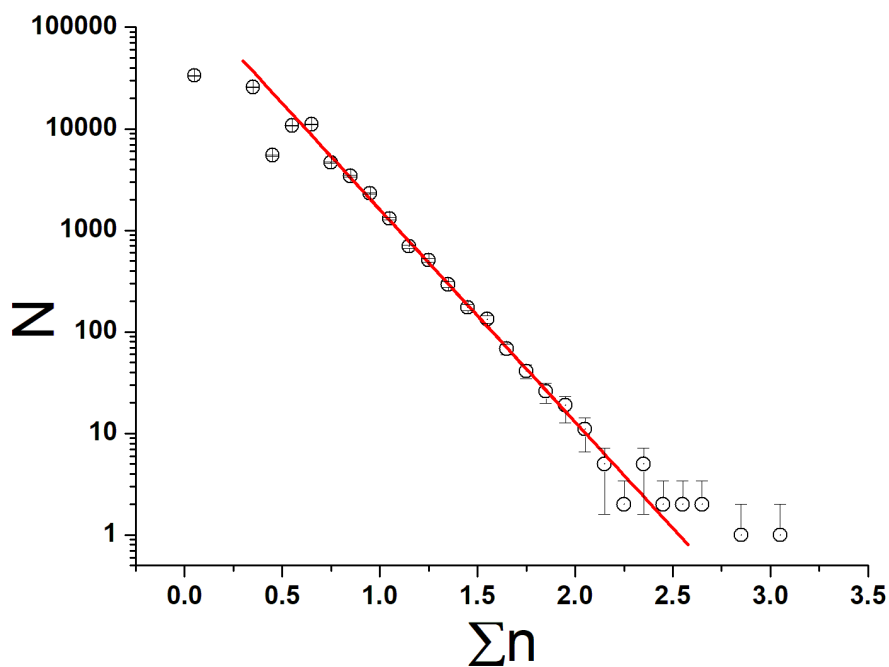


Рисунок 4.7 — Дифференциальный спектр по числу нейтронов, 1-й кластер

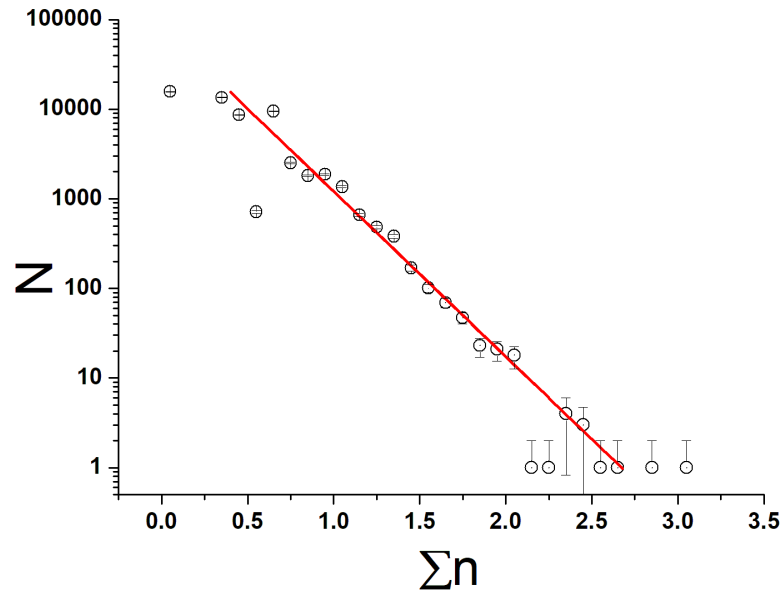


Рисунок 4.8 — Дифференциальный спектр по числу нейтронов, 2-й кластер

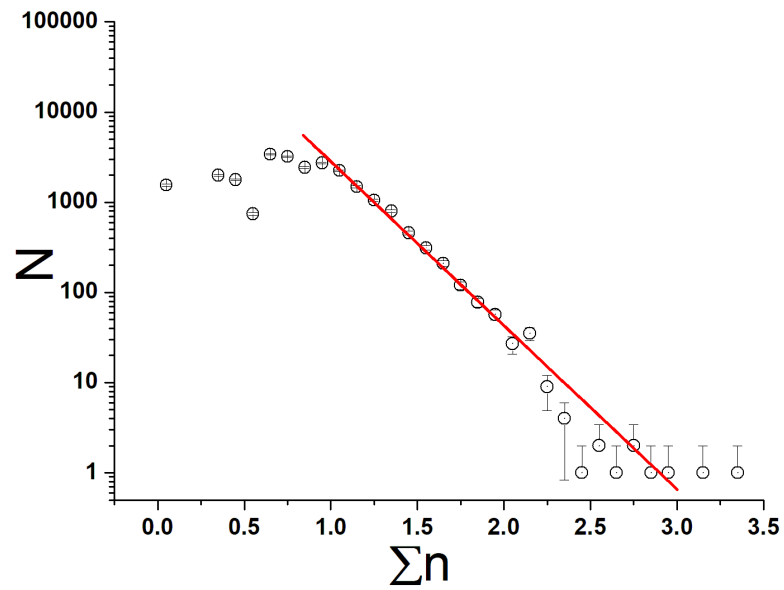


Рисунок 4.9 — Дифференциальный спектр по числу нейтронов при регистрации одновременно двумя кластерами

Показатель наклона дифференциального спектра по числу нейтронов ( $K$ ):

- Для 1-го кластера  $K = -2.07 \pm 0.03$ .
- Для 2-го кластера  $K = -1.84 \pm 0.07$ .
- Для 1&2  $K = -1.82 \pm 0.05$ .

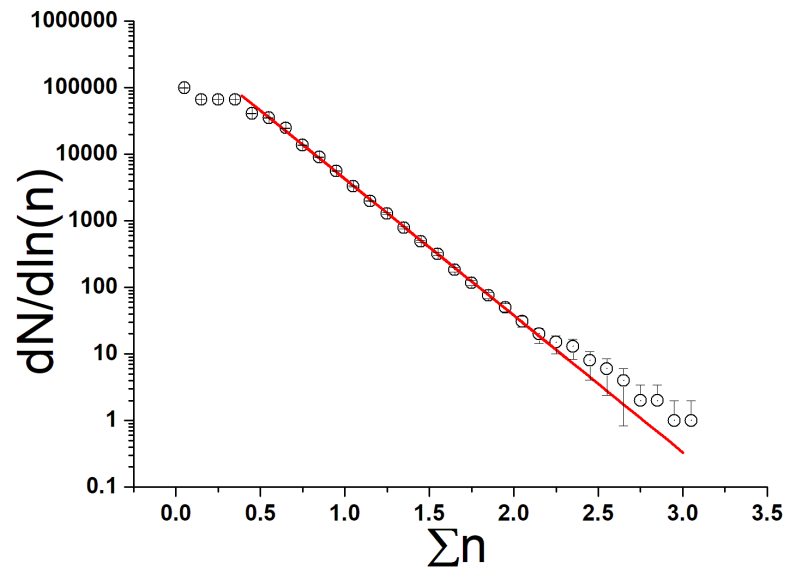


Рисунок 4.10 — Интегральный спектр по числу нейтронов, 1-й кластер

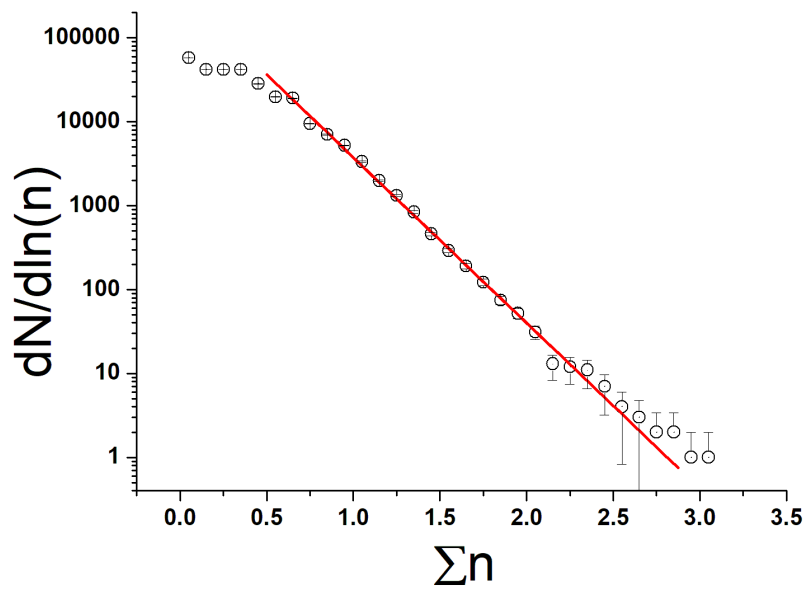


Рисунок 4.11 — Интегральный спектр по числу нейтронов, 2-й кластер

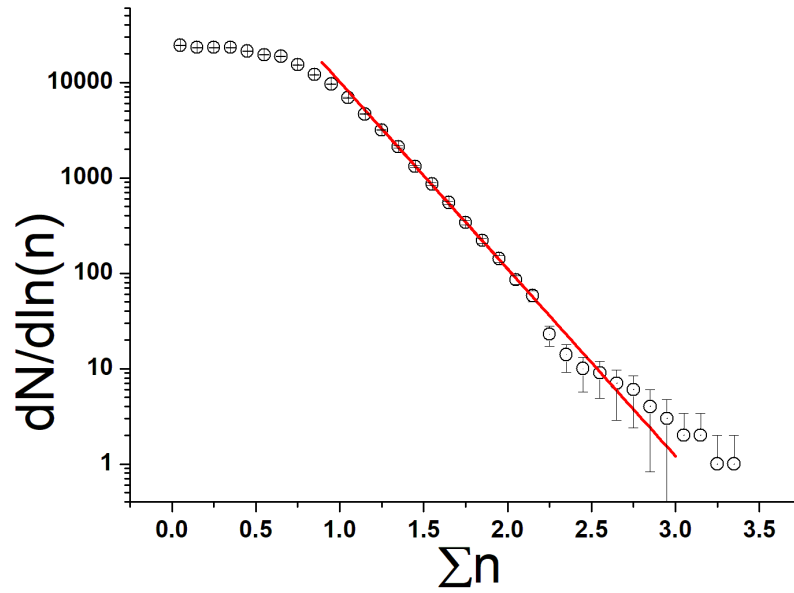


Рисунок 4.12 — Интегральный спектр по числу нейтронов при регистрации одновременно двумя кластерами

Показатель наклона интегрального спектра по числу нейтронов ( $K$ ):

- Для 1-го кластера  $K = -2.05 \pm 0.01$ .
- Для 2-го кластера  $K = -1.98 \pm 0.03$ .
- Для 1&2  $K = -1.96 \pm 0.01$ .

Полученные показатели наклона интегральных спектров по числу нейтронов хорошо согласуются с показателями, полученными ранее: с показателем наклона по экспериментальным данным ПРИЗМА-32 за 2012 — 2018 гг., представленным в [33], и с показателями наклона по модельными расчетам ПРИЗМА-32 и экспериментальным данным за 2012 — 2016 гг., представленным в [34]. А также имеют хорошее согласие с показателями адронного калориметра KASCADE, представленными в [35].



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая работу, можно выделить следующие результаты:

- Создано программное обеспечение, позволяющее обрабатывать данные установки ПРИЗМА-32 и автоматически создавать справку о работе детекторов за любой выбранный период ее работы.
- Проведен анализ полученных справок и выявлены проблемные детекторы установки. На основе полученных данных проведен ремонт 13 детекторов.
- Проведена фильтрация данных установки ПРИЗМА-32 за 02.2012 — 12.2021 гг.
- Спроектирована и создана база данных ПРИЗМА-32, содержащая экспериментальные данные работы установки за 02.2012 — 12.2021 гг.
- Проведена обработка данных за длительный период времени работы установки ПРИЗМА-32. В результате которой получены:
  - Временные распределения тепловых нейтронов, которые можно описать функцией с двумя экспонентами  $y(t) = A_1 \cdot e^{-t/t_1} + A_2 \cdot e^{-t/t_2} + y_0$ , где  $t_1 = 0.53 \pm 0.01$  мс,  $t_2 = 3.43 \pm 0.07$  мс.
  - Спектры энергосвыделения заряженной компоненты ШАЛ с показателем наклона  $K = -1.15 \pm 0.03$ .
  - Интегральные спектры по числу зарегистрированных нейтронов с показателем наклона  $K = -1.95 \pm 0.01$ .

Результаты данной работы были представлены на IX Международной молодежной научной школе-конференции “Современные проблемы физики и технологий” и являются основой доклада на 37 Всероссийской конференции по космическим лучам.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. M. Aguilar et al. First Result from the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station: Precision Measurement of the Positron Fraction in Primary Cosmic Rays of 0.5–350 GeV, *Phys. Rev. Lett.* 110, 141102 (2014).
2. G.B. Khristiansen, Yu.A. Fomin et al. Primary cosmic ray mass composition at energies  $10^{15}$  eV to  $10^{17}$  eV as measured by the MSU EAS array. *Astropart.Phys.* 2, 127-136 (1994).
3. M. Aglietta, B. Alessandro et al. The EAS-TOP array at Gran Sasso: results of the electromagnetic detector. *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)*, 16, p. 493 (1990).
4. M. Amenomori, Z. W. Bai, Z. Cao et al. Status and performance of the AS array of the Tibet AS experiment. *AIP Conf.Proc.* 220 257-264 (1991).
5. P. Bernardini, on behalf of the ARGO-YBJ Collaboration. The ARGO-YBJ experiment in Tibet. *J. Phys.: Conf. Ser.* 120 062022 (2008)
6. S. Yoshida, N. Hayashida, K. Honda et al. The Cosmic ray energy spectrum above  $3 \cdot 10^{18}$  eV measured by the Akeno Giant Air Shower Array. *Astropart.Phys.* 3 (1995) 105-124 (1995)
7. H. Kawai, T. Nunomura, N. Sakurai et al. Telescope Array: Progress of Surface Array. *Proc. 29th ICRC, Pune*, 8, p. 181 (2019).
8. M.B. Amelchakov, N.S. Barbashina et al. DECOR coordinate detector for studying cosmic rays at large zenith angles. *Bull.Russ.Acad.Sci.Phys.* 66 1779-1781, (2002)

9. W.D. Apel, J.C. Arteaga, F. Badea et al. New method to measure the attenuation of hadrons in extensive air showers. *Physical Review D*, 80 022002, (2009)
10. C.M.G. Lattes, M.S.M. Mantovani, C. Santos et al. Chacaltaya emulsion chamber experiment. *Prog.Theor.Phys.Suppl.* 47 1-125, (1971)
11. S.G. Baiburina, Z.M. Guseva, V.G. Denisova et al. Investigation of the Hadron Component of Cosmic Rays at High Altitudes Using Multilayer X-Ray Emulsion Chambers: The PAMIR Experiment. *Bull.Russ.Acad.Sci.Phys.* 44N3 8-11, (1980)
12. D. S. Adamov, V. V. Arabkin, S. P. Besshapov et al., Superyoung EAS with  $N_e > 10^7$ . The «Hadron» experiment. *Il Nuovo Cimento C* v. 19, p.999–1003, (1996)
13. Чубенко А. П., Щепетов А. Л., Пискаль В. В. и др. Спектр кратностей Тянь-Шаньского нейтронного супермонитора НМ64 и его связь с энергетическим спектром адронной компоненты на горах. *Изв. РАН Сер.физ.*1997. Т. 61. № 3. С. 488–492. (1997)
14. Yu.V. Stenkin, J.F. Valdes-Galicia et al. Study of "neutron bursts"with Mexico City neutron monitor. *Astroparticle Phys.* V.16(2). P. 157-168. (2001)
15. Yu.V. Stenkin and J.F. Valdés-Galicia. Neutron bursts in EAS: New physics or nuclear physics? *Proc. 27th ICRC*, 1, 1453 (2001)
16. Yu.V. Stenkin. On the PRISMA Project. *Nucl.Phys.B Proc.Suppl.* 196 293-296 (2009)
17. Yu.V. Stenkin, V.V. Alekseenko, et al. Thermal neutron flux produced by EAS at various altitudes. *Chinese Physics C*, v. 37, No 1, (2013)
18. Д.М. Громушкин. Установка для регистрации нейтронной компоненты ШАЛ. Кандидатская диссертация, НИЯУ МИФИ / Д.М. Громушкин. – НИЯУ МИФИ, 2014.

19. Yu.V. Stenkin, V.V. Alekseenko et al. Response of the PRISMA-YBJ Detectors to Earthquakes. Bull.Russ.Acad.Sci.Phys. 83 5, 607-610 (2019)
20. D.M. Gromushkin, N.S. Barbashina et al. Project of the URAN array for registration of atmospheric neutrons. J.Phys.Conf.Ser. 675 3, 032043 (2016)
21. Bing-Bing Li, Shu-Wang Cui et al. Electron-Neutron Detector Array (ENDA). Phys.At.Nucl. 84 6, 941-946 (2021)
22. [https://www.adlinktech.com/Products/GPIB/\\_Modular\\_Instruments/Digitizers\\_Oscilloscopes/PCI-9812\\_9810](https://www.adlinktech.com/Products/GPIB/_Modular_Instruments/Digitizers_Oscilloscopes/PCI-9812_9810). Дата обращения 22.06.2022
23. Мануал по библиотеке Pandas — <https://pandas.pydata.org/docs/development/index.html>. Дата обращения 01.06.2022
24. Мануал по библиотеке NumPy — <https://numpy.org/doc/stable/>. Дата обращения 01.06.2022
25. Мануал по библиотеке Matplotlib — <https://matplotlib.org/stable/contents.html>. Дата обращения 01.06.2022
26. Мануал по библиотеке PyQt6 — <https://www.riverbankcomputing.com/static/Docs/PyQt6/>. Дата обращения 01.06.2022
27. Мануал по библиотеке Python-Docx — <https://python-docx.readthedocs.io/en/latest/index.html>. Дата обращения 01.06.2022
28. Мануал по PostgreSQL — <https://www.postgresql.org/docs/>. Дата обращения 01.06.2022
29. Мануал по библиотеке SQLAlchemy — <https://docs.sqlalchemy.org/en/20/>. Дата обращения 01.06.2022
30. Д.М.Громушкин, А. А. Петрухин, Ю. В. Стенькин и др. Новый метод регистрации адронной компоненты ШАЛ. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, 2015, том 78, № 5, с. 379-382 (2015)

31. Z.T. Izhbulyakova, A.G. Bogdanov, F.A. Bogdanov et al. Investigation of the EAS neutron component with the URAN array: first simulation and experimental results. J.Phys.Conf.Ser. 1690 1, 012071 (2020)
32. D. M. Gromushkin, E. A. Zadeba, Yu. V. Stenkin et al. Energy Deposit Spectrum of the EAS Electromagnetic Component at the PRISMA32 Array. Izv.Ross.Akad.Nauk Ser.Fiz. 79 (2015) 3, 414-416 (2015)
33. D.M. Gromushkin, F.A. Bogdanov, Yu.V. Stenkin, O.B. Shchegolev, K.O. Yurin. Investigation of the EAS Neutron Component with the ПРИЗМА-32 Array. Phys.Part.Nucl. 49 4, 602-606 (2018)
34. О.Б. Щеголев. Изучение адронной компоненты широких атмосферных ливней методом регистрации тепловых нейтронов. Кандидатская диссертация, ИЯИ РАН / О.Б. Щеголев. – ИЯИ РАН , 2016.
35. Hörandel J.R. et al. Proc. 27th Int. Cosmic Ray Conf. (Hamburg). Vol. 1. P. 137. (2001)

# А ВРЕМЕННЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ КАЖДОГО ДЕТЕКТОРА УСТАНОВКИ ПРИЗМА-32

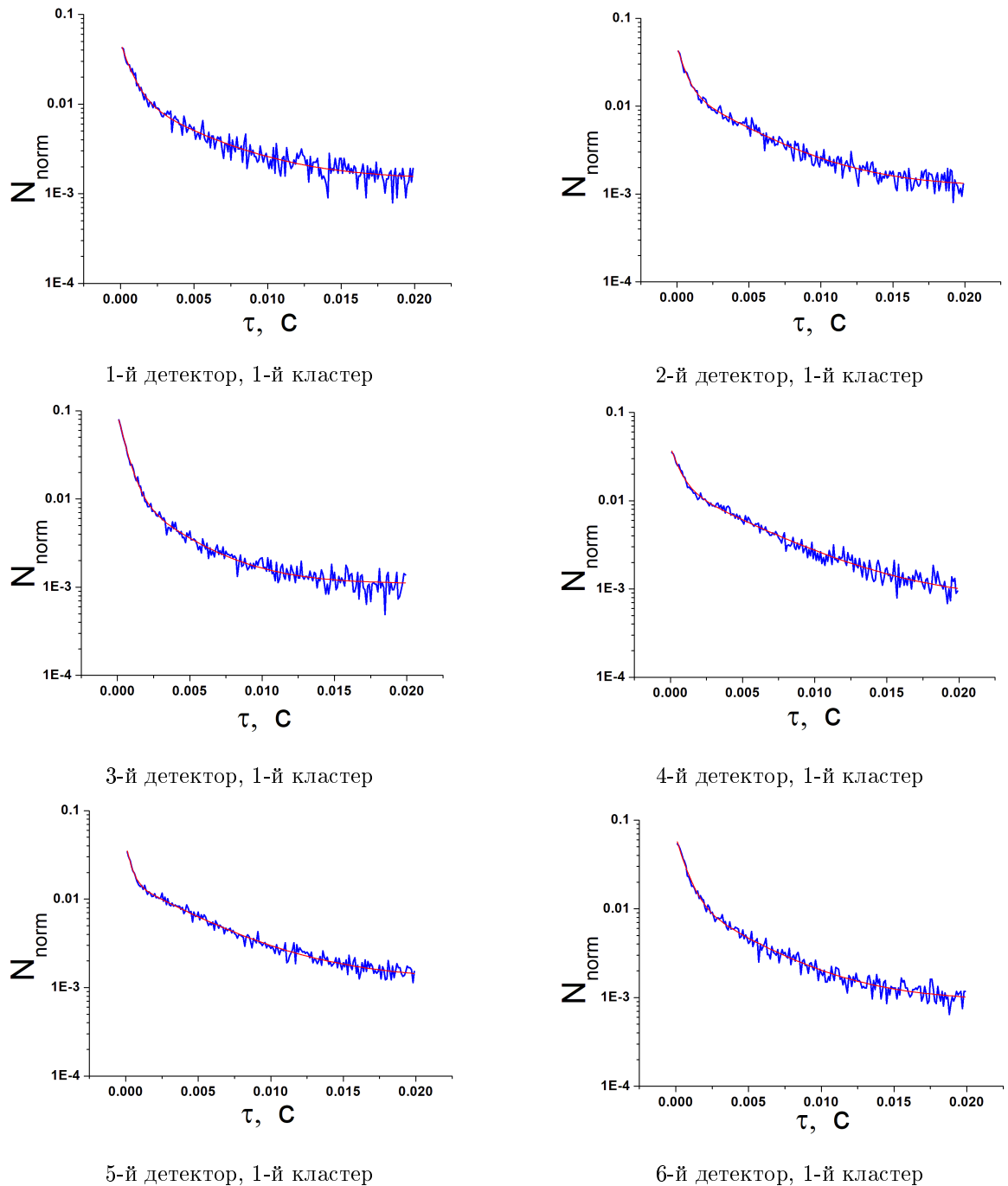
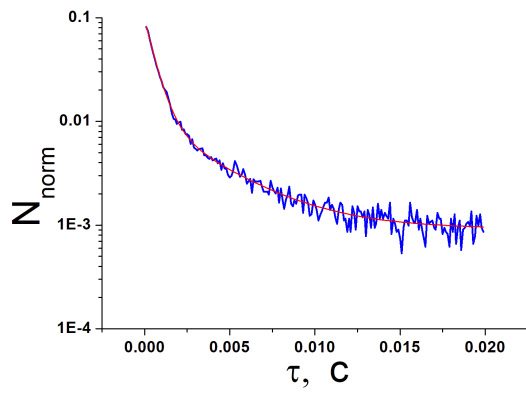
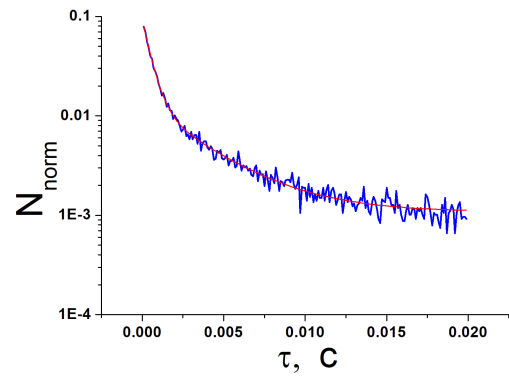


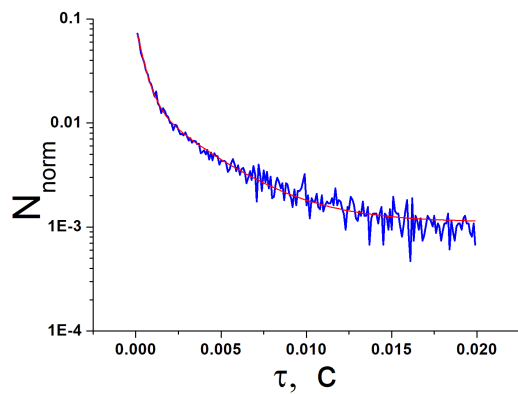
Рисунок 4.13 — Временное распределение нейтронов на детекторах 1 — 6, 1-й кластер



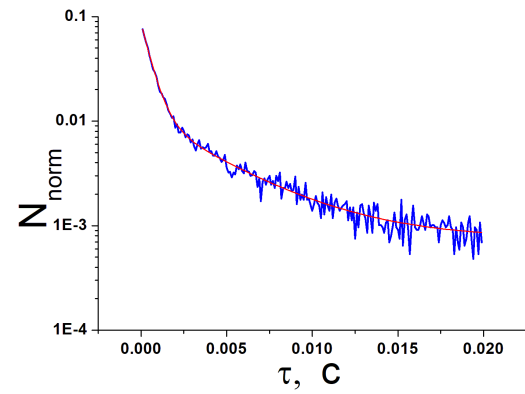
7-й детектор, 1-й кластер



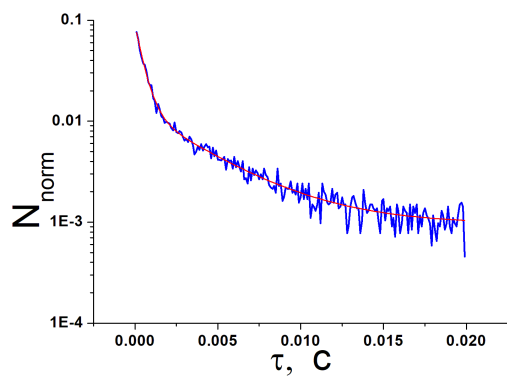
8-й детектор, 1-й кластер



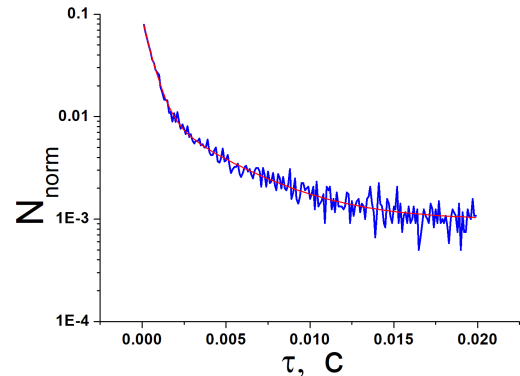
9-й детектор, 1-й кластер



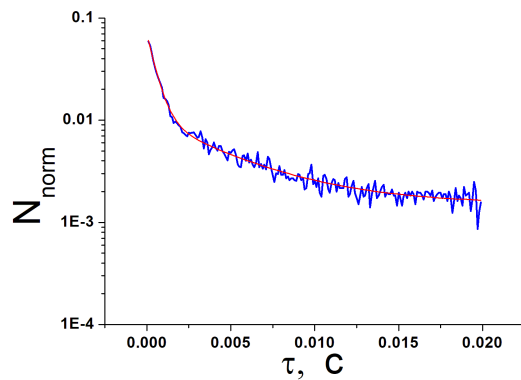
10-й детектор, 1-й кластер



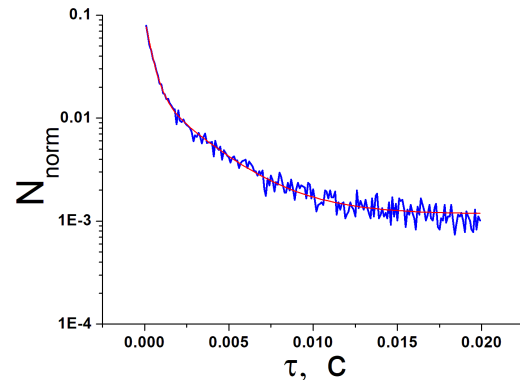
11-й детектор, 1-й кластер



12-й детектор, 1-й кластер

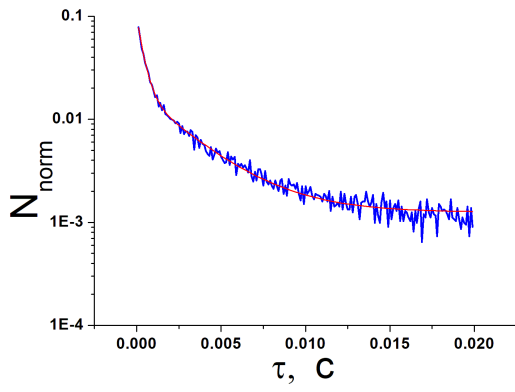


13-й детектор, 1-й кластер

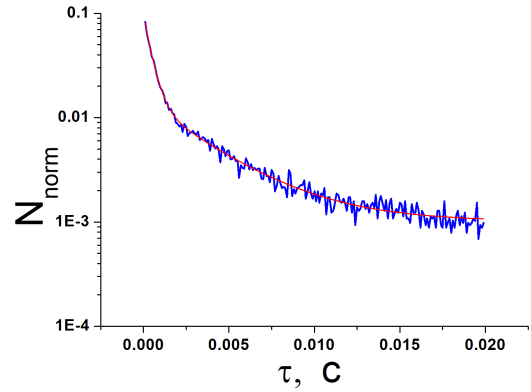


14-й детектор, 1-й кластер

Рисунок 4.14 — Временное распределение нейтронов на детекторах 7 — 14, 1-й кластер

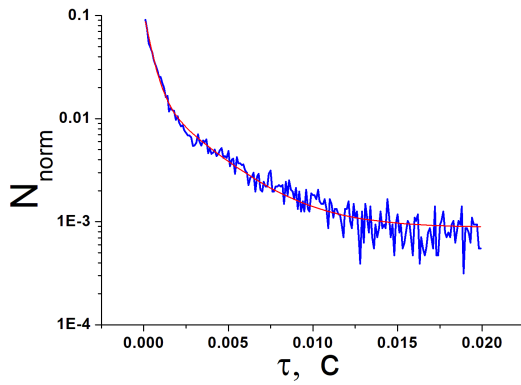


15-й детектор, 1-й кластер

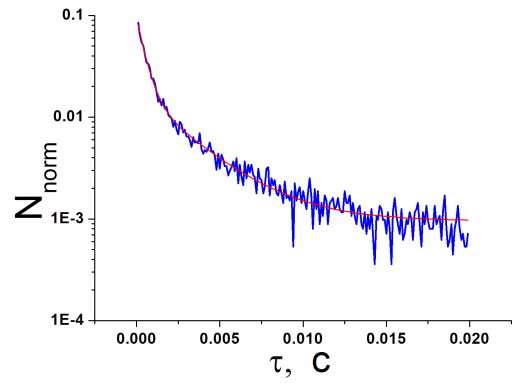


16-й детектор, 1-й кластер

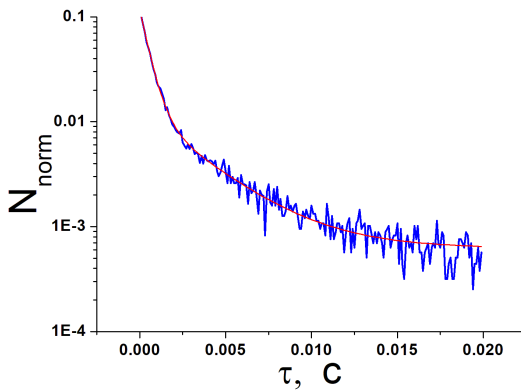
Рисунок 4.15 — Временное распределение нейтронов на детекторах 15 — 16, 1-й кластер



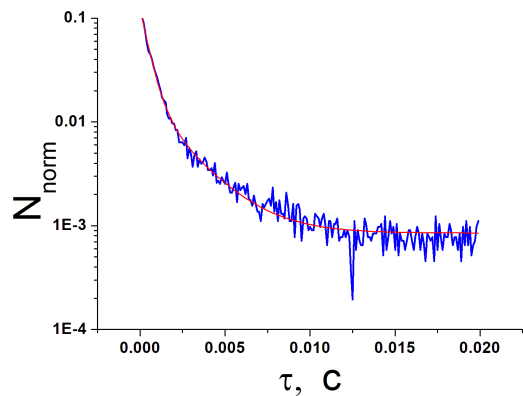
1-й детектор, 2-й кластер



2-й детектор, 2-й кластер



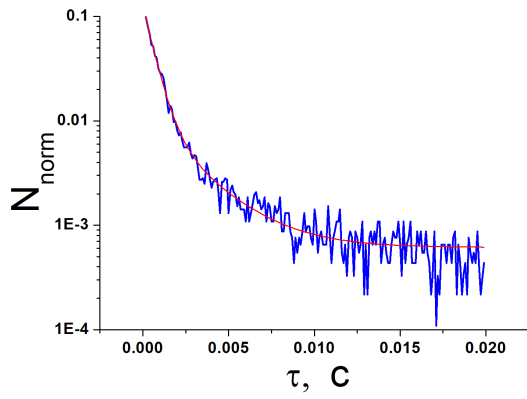
3-й детектор, 2-й кластер



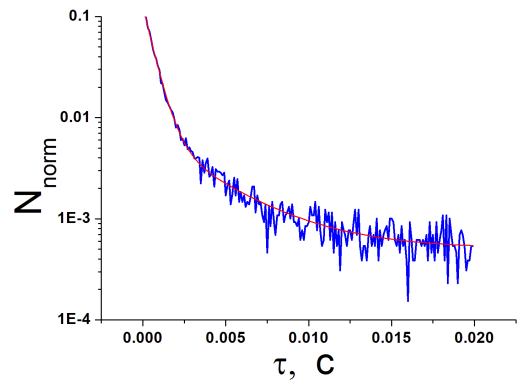
4-й детектор, 2-й кластер

Рисунок 4.16 — Временное распределение нейтронов на детекторах 1 — 4 , 2-й кластер

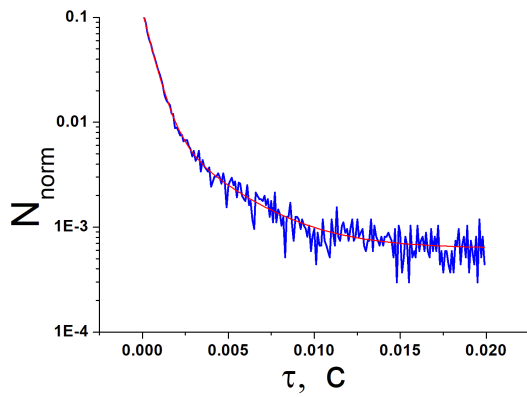




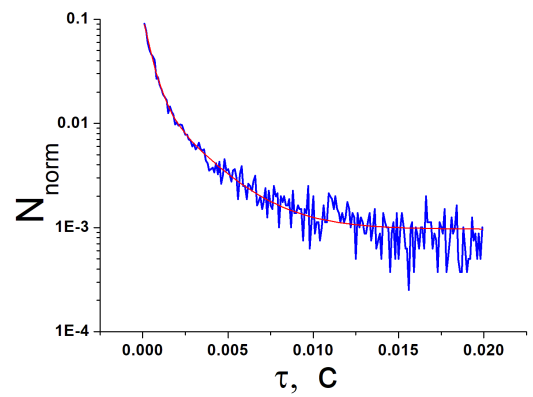
5-й детектор, 2-й кластер



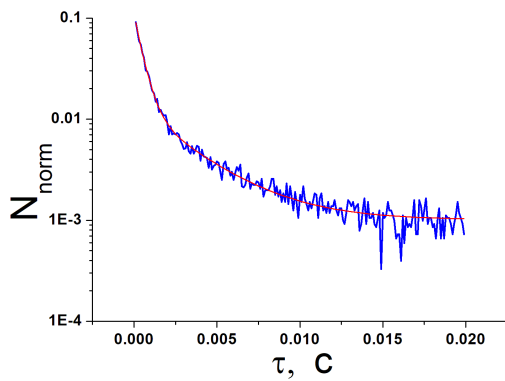
6-й детектор, 2-й кластер



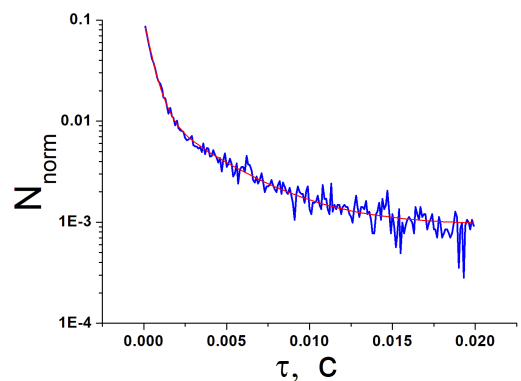
7-й детектор, 2-й кластер



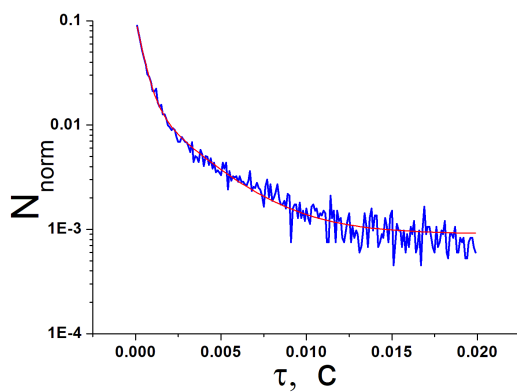
8-й детектор, 2-й кластер



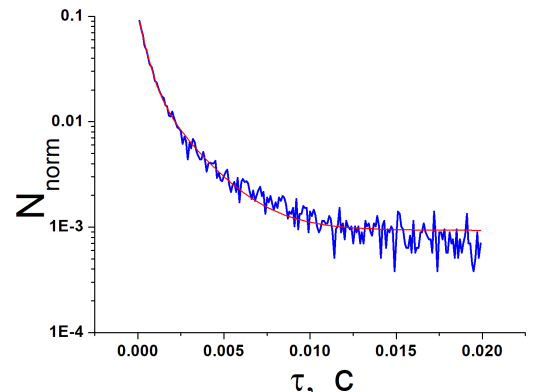
9-й детектор, 2-й кластер



10-й детектор, 2-й кластер

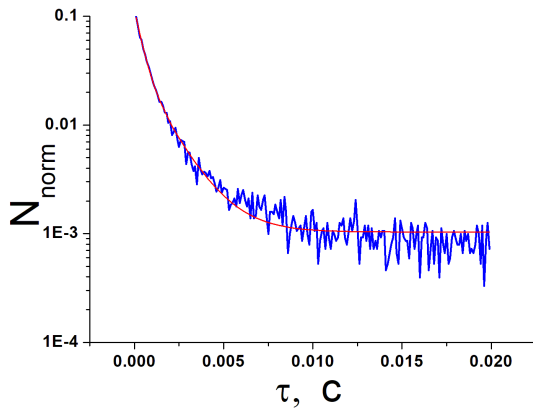


11-й детектор, 2-й кластер

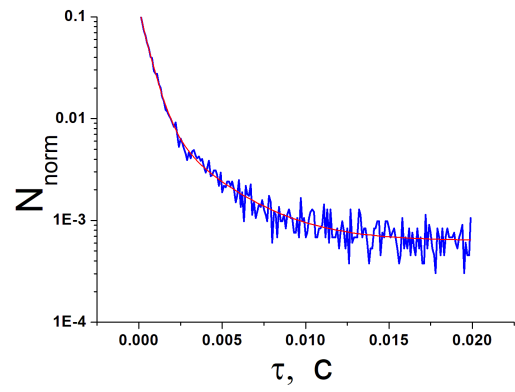


12-й детектор, 2-й кластер

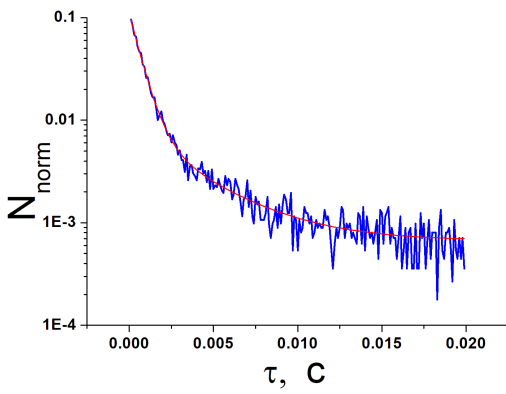
Рисунок 4.17 — Временное распределение нейтронов на детекторах 5 — 12, 2-й кластер



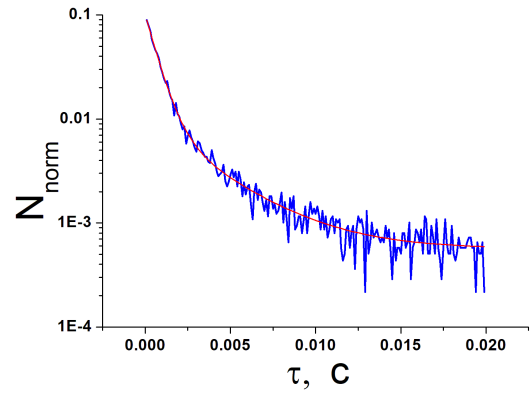
13-й детектор, 2-й кластер



14-й детектор, 2-й кластер



15-й детектор, 2-й кластер



16-й детектор, 2-й кластер

Рисунок 4.18 — Временное распределение нейтронов на детекторах 13 — 16, 2-й кластер