

На правах рукописи

ВОРОБЬЕВ ВЛАДИСЛАВ СТАНИСЛАВОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОЧАСТИЧНЫХ СОБЫТИЙ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ
НА ПРОТОТИПАХ КООРДИНАТНО-ТРЕКОВОГО ДЕТЕКТОРА ТРЕК**

Специальность 01.04.23 – Физика высоких энергий

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва 2022

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете
«МИФИ»

Научный руководитель: **Петрухин Анатолий Афанасьевич**
доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник НОЦ НЕВОД НИЯУ МИФИ, г. Москва

Официальные оппоненты **Рубцов Григорий Игоревич**
доктор физико-математических наук, профессор РАН, заместитель директора по научной работе Института ядерных исследований Российской академии наук, г. Москва

Просин Василий Владимирович
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории наземной гамма-астрономии Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, г. Москва

Ющенко Олег Петрович
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела экспериментальной физики Института физики высоких энергий (НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ), г. Протвино

Защита состоится “21” сентября 2022 г. в 15 час. 00 мин. На заседании диссертационного совета МИФИ.01.01 федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке на сайте: <https://ds.mepphi.ru> федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан «__» _____ 2022 года

Учёный секретарь
диссертационного совета,
д.ф.-м.н., профессор



Сергей Евгеньевич Улин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Во многих экспериментах по исследованию космических лучей высоких энергий наблюдается избыток числа событий с высокой плотностью мюонов по сравнению с расчётами [1]. Для изучения природы этого явления предлагается исследовать энергии этих мюонов [2]. Единственный эксперимент, в котором сегодня можно выполнить это исследование, - это НЕВОД-ДЕКОР [3]. Черенковский водный калориметр НЕВОД позволяет измерять энерговыделение мюонов, прошедших через него, а координатно-трековый детектор ДЕКОР – определить плотность мюонов в группе и их направление прилёта. Совместные измерения НЕВОД и ДЕКОР позволили оценить средние энергии мюонов в группе.

Однако детектор ДЕКОР обладает двумя недостатками. Во-первых, он не перекрывает всю боковую сторону калориметра, что не позволяет измерить точное число мюонов, прошедших через НЕВОД. Во-вторых, двухтрековое разрешение детектора 3 см, что ограничивает возможность исследования событий с высокой плотностью мюонов, для которых наблюдается избыток.

Для решения этой проблемы в НИЯУ МИФИ разрабатывается новый крупномасштабный координатно-трековый детектор ТРЕК [4] на основе многопроволочных дрейфовых камер. Новый детектор будет перекрывать всю боковую сторону калориметра, имея эффективную площадь 250 м^2 , что превышает площадь боковой части ДЕКОР в 7 раз, а также обладать двухтрековым разрешением 3 мм, т.е. в 10 раз лучше, чем у ДЕКОР.

На сегодняшний день разработаны два прототипа детектора ТРЕК – координатно-трековая установка на дрейфовых камерах (КТУДК) и прототип детектора ТРЕК ПротоТРЕК. Анализ экспериментальных данных обоих прототипов позволил выявить две важные проблемы. Во-первых, при регистрации событий с высокой плотностью частиц существенная доля сигналов пропадает, что связано с ограниченными возможностями используемого время-цифрового преобразователя. Во-вторых, наличие послеимпульсов на выходе усилителя-формирователя и непараллельных треков от вторичных частиц часто приводит к ложным реконструкциям.

Цель работы

Разработка новых аппаратных и программных методов регистрации и реконструкции многочастичных событий высокой плотности для многопроволочных дрейфовых камер и их проверка на основе экспериментальных данных, полученных на прототипах детектора ТРЕК.

Задачи работы

- 1) Разработка нового многоканального время-цифрового преобразователя (ВЦП) на основе FPGA Altera Cyclone V и front-end программного обеспечения.
- 2) Разработка регистрирующей системы и серверных программ для обеспечения работы установки ПротоТРЕК с учётом временной синхронизации ВЦП.
- 3) Моделирование регистрации треков мюонов дрейфовой камерой с помощью программного пакета Garfield++.
- 4) Разработка методов анализа данных на основе свёрточных и рекуррентных нейронных сетей. Обучение нейронных сетей на моделированных и экспериментальных данных.
- 5) Реконструкция и анализ одночастичных и многочастичных событий, зарегистрированных установкой ПротоТРЕК, с применением методов глубокого обучения.
- 6) Реконструкция и анализ событий с группами мюонов, зарегистрированных с помощью КТУДК, с применением методов глубокого обучения.
- 7) Оценка диапазона энергий космических лучей, который может быть изучен на полномасштабном детекторе ТРЕК.

Научная новизна и практическая значимость

Разработанная аппаратура и методы реконструкции многочастичных событий на основе нейронных сетей впервые в мире позволят проводить исследования групп мюонов в рекордном энергетическом диапазоне космических лучей $10^{14} - 10^{19}$ эВ с помощью одного координатно-трекового детектора на основе многопроволочных дрейфовых камер.

Созданный новый время-цифровой преобразователь и разработанная на его основе регистрирующая система будут использоваться в крупномасштабной установке ТРЕК.

Новый метод реконструкции событий на основе искусственных нейронных сетей позволит автоматизировать обработку экспериментальных данных установки ТРЕК. Метод может быть также применен в других экспериментах с использованием дрейфовых камер.

Личный вклад

Автор участвовал в разработке и монтаже установок ПротоТРЕК и КТУДК, а также в обеспечении их работоспособности. Лично автором

выполнены следующие работы, результаты которых приведены в диссертации:

- 1) Разработка нового время-цифрового преобразователя и его программного обеспечения.
- 2) Разработка регистрирующей системы и сервер-клиентского ПО для ПротоТРЕК с учётом временной синхронизации двух ВЦП.
- 3) Моделирование регистрации треков заряженных частиц дрейфовой камерой в среде Garfield++. Анализ послеимпульсов в экспериментальных и моделированных данных.
- 4) Разработка нейросетевых методов реконструкции многочастичных событий по данным дрейфовых камер.
- 5) Анализ одночастичных и многочастичных событий, зарегистрированных установкой ПротоТРЕК.
- 6) Анализ групп мюонов, зарегистрированных КТУДК, и сравнение с данными координатно-трекового детектора ДЕКОР.
- 7) Оценка энергий космических лучей, генерирующих группы мюонов, которые зарегистрированы установкой КТУДК и будут регистрироваться детектором ТРЕК.

Положения и результаты, выносимые на защиту

- 1) Новый многоканальный время-цифровой преобразователь на основе FPGA Altera Cyclone V и программное обеспечение.
- 2) Регистрирующая система координатно-трекового детектора ПротоТРЕК и сервер-клиентское ПО для синхронизации работы время-цифровых преобразователей.
- 3) Результаты моделирования процесса регистрации мюонов с помощью дрейфовой камеры в программном пакете Garfield++.
- 4) Разработанный фильтр сигналов, получаемых с дрейфовых камер, с помощью свёрточных нейронных сетей, и метод распределения сигналов по трекам частиц с помощью рекуррентных нейронных сетей.
- 5) Результаты измерения и реконструкции одночастичных и многочастичных событий с помощью детектора ПротоТРЕК, анализ событий с высокой плотностью частиц.
- 6) Результаты применения нового метода реконструкции событий с помощью искусственных нейронных сетей к данным КТУДК, анализ измерений групп мюонов и сравнение совместных событий с данными ДЕКОР.
- 7) Оценка диапазона энергий космических лучей, который может быть изучен на полномасштабном детекторе ТРЕК.

Достоверность

- 1) Достоверность реконструкции многочастичных событий с применением методов глубокого обучения подтверждается согласием результатов реконструкции Монте-Карло моделированных событий с параметрами, заданными при моделировании изначально.
- 2) Достоверность результатов реконструкции плотности мюонов с помощью КТУДК с применением методов глубокого обучения подтверждается совместными событиями с установкой ДЕКОР.
- 3) Достоверность результатов измерений и реконструкции данных ПротоТРЕК подтверждается совпадением плотностей заряженных частиц по данным двух плоскостей дрейфовых камер.

Апробация результатов работы

Основные результаты исследований по теме диссертации представлены автором на российских и международных конференциях:

- 1) The 2nd International Conference on Particle Physics and Astrophysics (Москва, 2016).
- 2) Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2017» (МГУ).
- 3) VI Международная научная школа-конференции «Современные проблемы физики и технологий» (НИЯУ МИФИ, 2017).
- 4) International Symposium on Cosmic Rays and Astrophysics (НИЯУ МИФИ, IS CRA-2017 и IS CRA-2021).
- 5) Международная конференция-конкурс молодых физиков (ФИАН, 2018).
- 6) Черенковские чтения (ФИАН, 2018, 2021).
- 7) Moscow International School of Physics (НИУ ВШЭ “Воронovo” 2019, 2020).
- 8) 27th Symposium on Nuclear Electronics and Computing - NEC'2019 (Будва, Черногория).
- 9) The International Conference Instrumentation for Colliding Beam Physics (Новосибирск, INSTR2020).
- 10) 36-я Всероссийская конференция по космическим лучам (Дубна, 2020).
- 11) Moscow International School on NPhE-2020 (НИЯУ МИФИ).
- 12) The 37th International Cosmic Ray Conference 2021 (Берлин).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и одного приложения. Объем диссертации: 136 страниц, 109 рисунков, 8 таблиц, 90 наименований цитируемой литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении описывается текущее состояние проблемы избытка групп мюонов. Рассматривается ряд экспериментов, в которых исследовались эти группы. Сформулированы цель, задачи, научная новизна и выносимые на защиту результаты.

В главе 1 приводится обзор экспериментов и используемых в них методов регистрации мюонов космических лучей.

Среди ускорительных экспериментов исследования групп мюонов космических лучей проводились на ALEPH [5], DELPHI [6], L3+Cosmic [7] и ALICE [8].

В эксперименте L3+Cosmic избыток мюонов не наблюдался, так как регистрировались события с низкой множественностью (до 20), в то время как в двух других экспериментах ускорителя LEP избыток наблюдался при множественностях мюонов свыше 100. Все результаты измерений сравнивались с расчётами моделирования методом Монте-Карло с применением модели адронного взаимодействия QGSJET.

В эксперименте ALICE результаты измерений групп мюонов сравнивались с расчётами с применением моделей QGSJET-II-03 и QGSJET-II-04. В анализе авторы ограничились сверху множественностью 70. До этого значения множественности экспериментальные результаты хорошо согласуются с расчётами. Однако результаты измерений с множественностями выше 70 лежат выше расчётной кривой, предполагающей чисто железный состав первичных космических лучей.

Рабочая группа по адронным взаимодействиям и физике ливней (WHISP) обобщила результаты исследований групп мюонов в экспериментах по регистрации широких атмосферных ливней [9] (рис. 1). Результаты представлены в виде параметра z :

$$z = \frac{\ln(N_{\mu}^{det}) - \ln(N_{\mu}^{sim,p})}{\ln(N_{\mu}^{sim,Fe}) - \ln(N_{\mu}^{sim,p})} \quad (1)$$

где N_{μ}^{det} – полученное в эксперименте число мюонов, $N_{\mu}^{sim,p}$ и $N_{\mu}^{sim,Fe}$ – ожидаемое число мюонов, которое должны получиться в эксперименте при чисто протонном и чисто железном составе первичных космических лучей, соответственно. На рисунке видно, что во многих экспериментах результаты измерений лежат выше значения, предполагающего чисто железный состав космических лучей. В то же время имеются эксперименты, в которых это явление не наблюдается.

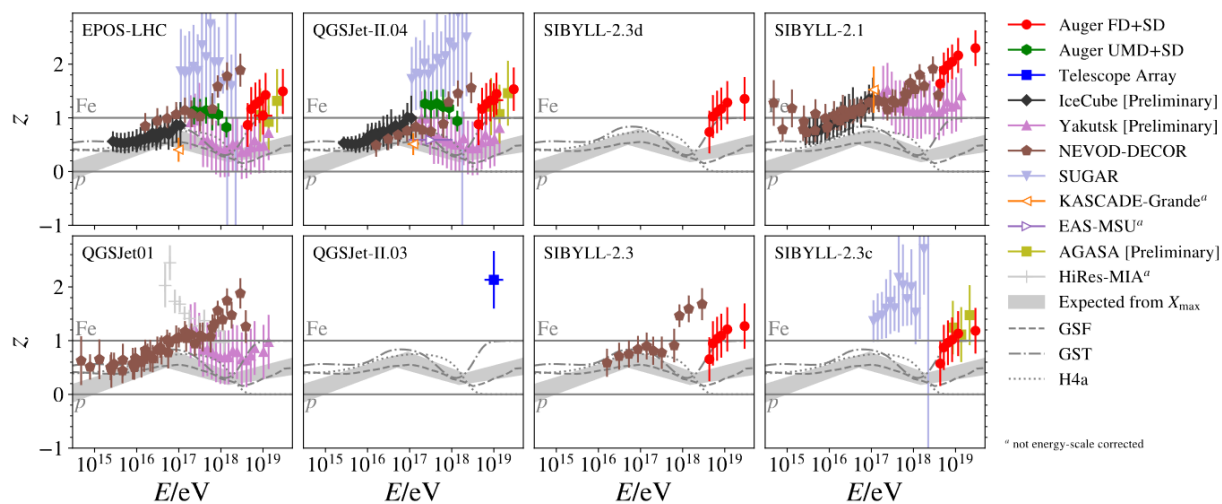


Рисунок 1. Зависимость параметра Z в разных экспериментах от энергии первичных космических лучей.

В разных экспериментах по исследованию широких атмосферных ливней можно выделить три метода регистрации мюонов (рис. 2).

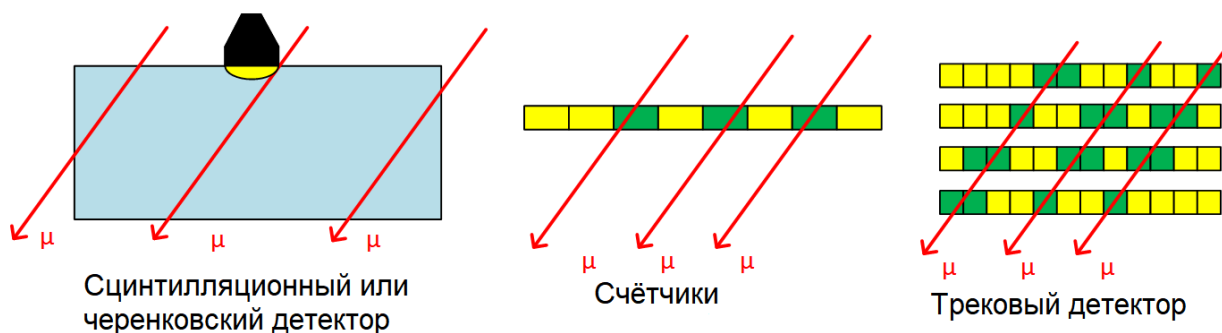


Рисунок 2. Методы регистрации групп мюонов в различных экспериментах.

В первом методе измеряется амплитуда сигнала в сцинтилляционном или черенковском детекторе. Такой метод позволяет регистрировать высокие плотности заряженных частиц. Амплитуда пропорциональна длине трека частицы внутри детектора. В случае наклонных ливней длины мюонных треков могут сильно различаться. Кроме того, в результате взаимодействия мюонов могут образовываться каскады, которые вносят существенный вклад в сигнал (рис. 3). В результате оценочная множественность частиц может отличаться от действительной.

Во втором методе количество мюонов пропорционально количеству сработавших счётчиков, причём эта зависимость линейна только при малом количестве счётчиков с откликом. Метод позволяет измерить именно среднее число мюонов в определённом классе событий.

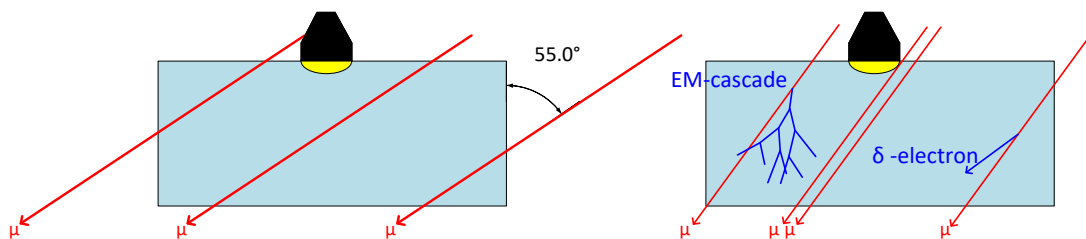


Рисунок 3. Слева: регистрация пучка мюонов под углом 55° . Справа: электромагнитный каскад и образование δ -электрона внутри детектора.

В третьем методе число мюонов определяется по числу реконструированных треков в трековом детекторе. Такой метод позволяет точно измерить число мюонов в отдельном событии, выделяя их среди всех регистрируемых треков. Таким образом, трековые детекторы лучше всего подходят для задачи исследования групп мюонов.

Именно поэтому среди всех экспериментов, рассмотренных группой WHISP, выделяется НЕВОД-ДЕКОР, который позволяет изучать космические лучи в широком диапазоне энергий 3×10^{14} - 3×10^{18} с использованием трекового детектора относительно малой площади 70 м^2 и метода спектров локальной плотности мюонов [10].

В остальных экспериментах избыток наблюдается преимущественно в тех, в которых плотность мюонов измеряется на расстояниях от оси ливня от 600 м и больше и при энергиях первичных ядер порядка 10^{18} эВ и выше.

В главе 2 описываются многопроволочная дрейфовая камера [11], на основе которой разрабатывается ТРЕК, и созданы прототипы этого детектора.

Многопроволочные дрейфовые камеры разработаны в Институте физики высоких энергий (Протвино) и использовались в нейтринном эксперименте на ускорителе У-70 [12].

Размеры одной камеры составляют $4000 \times 508 \times 112 \text{ мм}^3$. Газовый объём камеры около 200 л. Используется газовая смесь 94% Ar и 6% CO_2 . На рисунке 4 показано поперечное сечение камеры со схемой его работы. Камера имеет 4 сигнальные проволоки, расположенные в центре и смещённые от него на 0.75 мм в шахматном порядке (см. рис. 4). Электроны дрейфуют от точек ионизации до сигнальных проволок с постоянной скоростью около 45.4 мм/мкс.

Для исследования совместной работы дрейфовых камер с триггерной системой экспериментального комплекса НЕВОД, отработки методов реконструкции многочастичных событий и отладки регистрирующей электроники в 2015 году создан первый прототип – координатно-трековая установка на дрейфовых камер (КТУДК) (рис. 5). Этот прототип состоит из

двух параллельных плоскостей с одинаковой ориентацией камер, что не позволяет полностью реконструировать треки частиц в пространстве и отработать метод реконструкции по данным двух координатных плоскостей. Это стало одной из причин создания нового прототипа детектора из двух плоскостей с разной ориентацией камер.

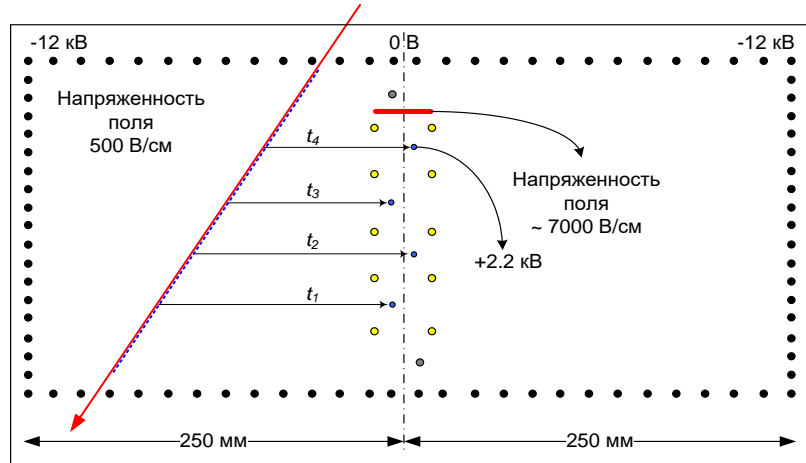


Рисунок 4. Принцип работы дрейфовой камеры ИФВЭ.

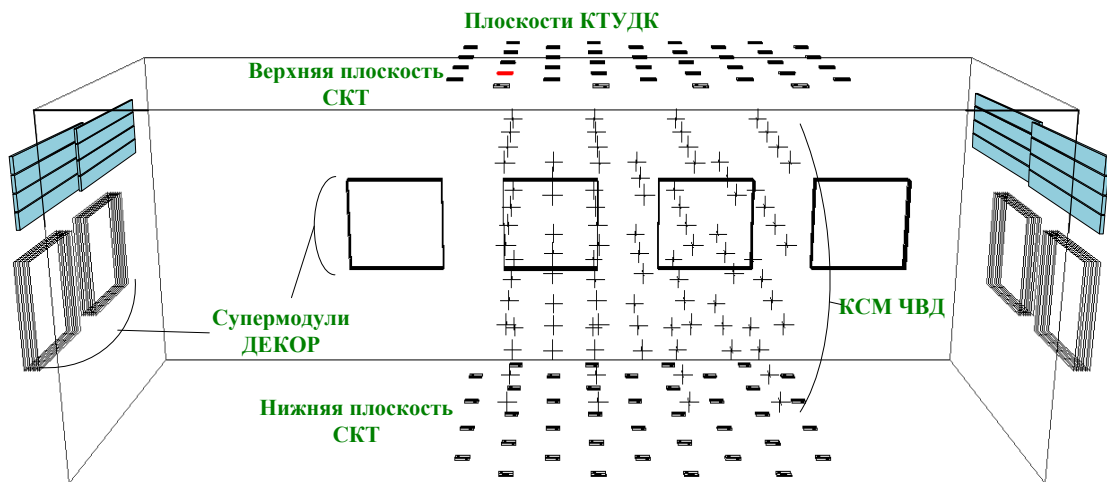


Рисунок 5. Координатно-трековая установка на дрейфовых камерах.

Этот прототип получил название ПротоТРЕК. Схематично детектор показан на рисунке 6. Каждая плоскость содержит 7 камер. Обе плоскости расположены между сцинтилляционными детекторами площадью 1 м^2 каждый, которые в режиме совпадений обеспечивают дрейфовые камеры триггером.

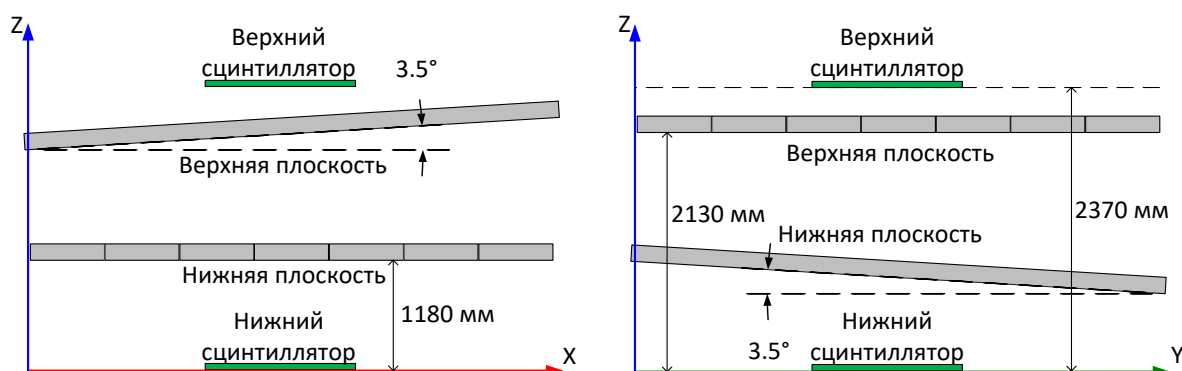


Рисунок 6. Схема расположения дрейфовых камер и сцинтилляционных счётчиков прототипа ТРЕК.

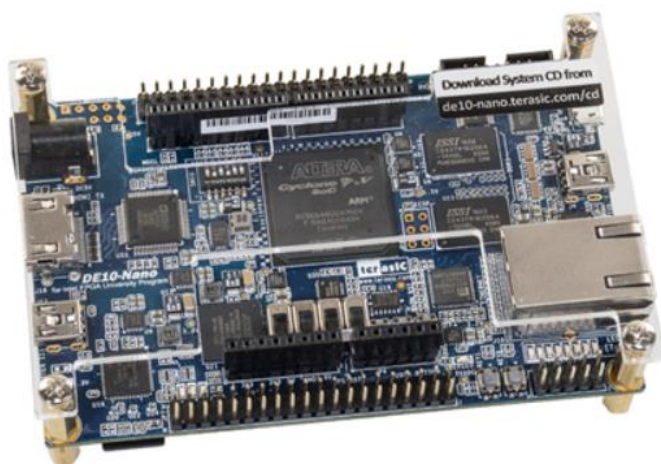


Рисунок 7. Отладочная плата DE0-Nano-SoC вместе с FPGA Altera Cyclone V.

На ПротоТРЕК было проведено испытание нового время-цифрового преобразователя (ВЦП), разработанного на основе FPGA Altera Cyclone V (рис. 7) [13]. Отладочная плата оснащена операционной системой Linux, что позволяет удобно работать в режиме сервер-клиент. Разрядность системы позволяет одному преобразователю

обслуживать 8 дрейфовых камер. ВЦП считывает сигналы с периодом 5 нс, что лучше разрешения самой дрейфовой камеры. 1 Гбайт оперативной памяти на плате обеспечивает возможность хранения большого числа сигналов в одном событии.

На ПротоТРЕК используются два таких ВЦП. Их синхронизация выполняется с помощью сигнала с GPS-антенны. Каждый преобразователь, обслуживающий свою плоскость камер, является клиентом, который подключается к серверу на центральном ПК детектора. При подключении сервер посылает на платы начальную временную метку, получаемую с GPS-антенны. При поступлении триггерного сигнала на ВЦП формируется сетевой пакет, содержащий информацию о дате события и сигналы со всех камер плоскости. Этот пакет посылается на сервер, который записывает информацию в отдельный файл для каждого ВЦП. После проведения экспозиции события с каждого преобразователя объединяются по времени. Ширина временного окна для совпадения событий с двух ВЦП составляет 1

мкс. Каждые 20 минут экспозиции выполняется измерение шумов всех сигнальных каналов, что обеспечивает мониторинг состояния детектора.

В главе 3 описываются методы реконструкции многочастичных событий по данным дрейфовых камер и результаты Монте-Карло моделирования с помощью программного пакета Garfield++.

Основной сложностью реконструкции треков по данным дрейфовых камер является то, что одному сигналу соответствуют две точки, симметрично расположенные относительно сигнальной проволоки (рис. 8). Так в идеальных условиях для одного трека при четырёх сигнальных каналах имеется восемь точек на плоскости и восемь возможных комбинаций прохождения трека. Реконструкция одного трека выполняется с помощью метода наименьших квадратов, а критерием служит сумма квадратов отклонений. Так, среди восьми возможных комбинаций, истинной является та, для которой эта сумма минимальна.

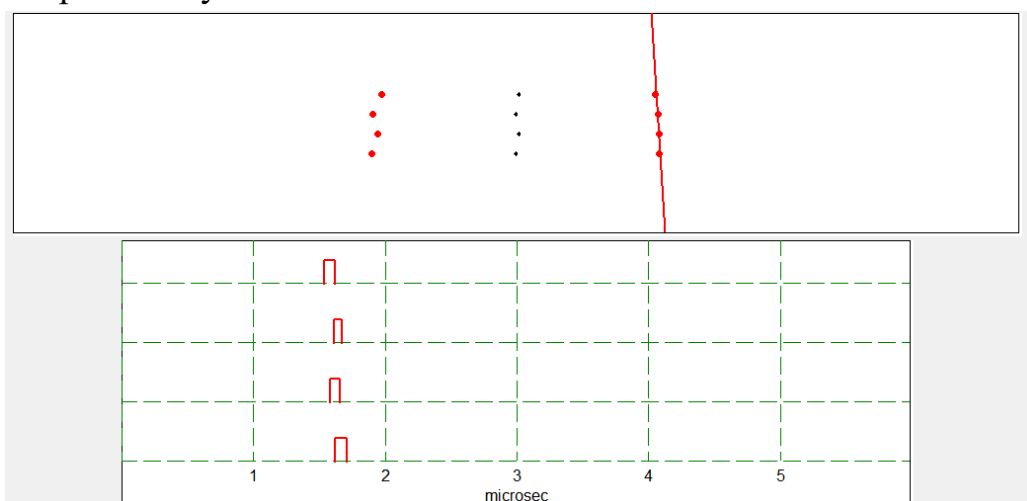


Рисунок 8. Соответствие одному сигналу двух точек на канале в дрейфовой камере.

Ранее для установки КТУДК были разработаны три аналитических метода реконструкции многочастичных событий, среди которых основным является метод гистограммирования. В этом методе с каждой точки первого сигнального канала проводится коридор на уровне других каналов с заданной шириной и под варьируемым углом. Если на всех каналах в отдельном таком коридоре имеются точки, то по ним выполняется реконструкция. Таким образом, метод позволяет искать параллельные треки. А истинной реконструкцией принимается та, в которой было найдено и реконструировано наибольшее количество треков при варьировании угла коридора.

В ходе анализа многочастичных событий, полученных на КТУДК, было обнаружено, что в половине событий для отдельных треков наблюдаются

вторичные сигналы – послеимпульсы, которые приводят к ложным реконструкциям. Причина появления послеимпульсов заключается в дрейфующем облаке электронов. Для треков частиц, прошедших параллельно нормали камеры, ширина облака минимальна, и электроны почти одновременно достигают сигнальных проволок. А для наклонных треков ширина облака становится значимой, электроны высаживаются неодновременно, и наблюдаются несколько сигналов от одной частицы.

Для решения этой проблемы предложено использовать искусственные нейронные сети. Но, прежде всего, для работы с нейронными сетями необходимо получить выборку событий, в которых известно, какие сигналы являются послеимпульсами. Такую выборку можно получить с помощью моделирования Монте-Карло с использованием программного пакета Garfield++ [14].

Во время моделирования разыгрывались треки мюонов с энергией 1 ГэВ. Для отдельного трека истинными сигналами являлись первые на временной оси, а остальные считались послеимпульсами. В многочастичных событиях информация о сигналах получалась за счёт моделирования каждого трека отдельно. А в конце от каждого такого трека суммировались аналоговые временные развёртки сигналов для получения многочастичного события.

Моделирование с помощью Garfield++ подтвердило природу послеимпульсов, а также показало влияние наводок от одной сигнальной проволоки на другую, которые тоже могут приводить к появлению послеимпульсов.

Для исключения послеимпульсов из данных был разработан фильтр на основе свёрточных нейронных сетей. Для этого фильтра данные с дрейфовой камеры представляются в виде бинарной матрицы размером 4×600, где строки соответствуют сигнальным каналам, а каждый столбец соответствует временному интервалу 10 нс (рис. 9). При наличии сигнала соответствующий элемент матрицы принимает значение 1, в противном случае 0.

0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0

Рисунок 9. Схематичное изображение входных данных с дрейфовой камеры для нейронных сетей.

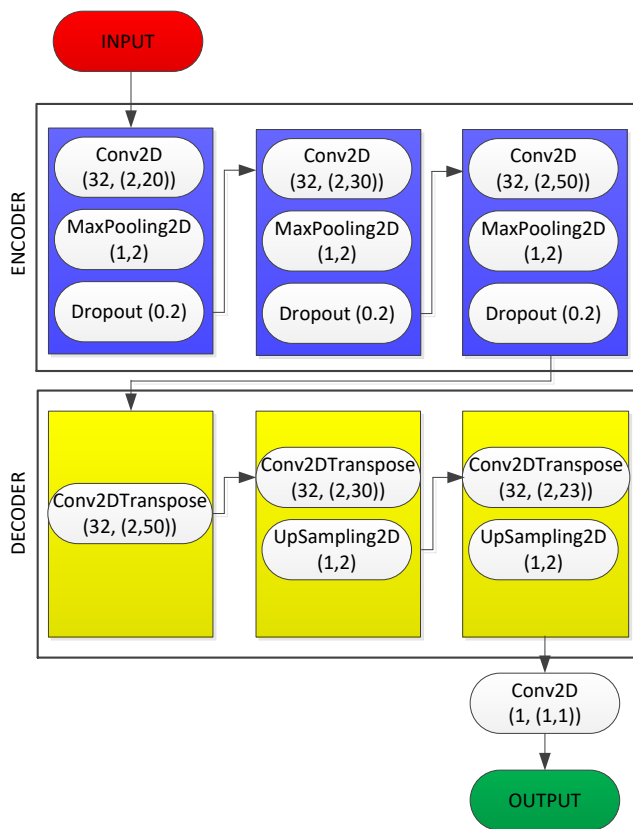


Рисунок 10. Архитектура фильтра сигналов на основе Conv2D-Conv2DTranspose слоёв.

Обучающая и тестовая выборки состояли из моделированных событий с множественностью от 1 до 5. Испытывались разные архитектуры нейронной сети. Наилучшей архитектурой оказалась Encoder-Decoder (рис. 10), с помощью которой на тестовой выборке исключено 85% всех послеимпульсов, сохраняя при этом 94% полезных сигналов. На рисунке 11 показан пример реконструкции моделированного события с применением фильтра. В центре рисунка показана входная временная развёртка сигналов, снизу – выходная, а сверху – реконструкции. Как видно, в этом событии два трека. Без фильтра с помощью метода гистограммирования реконструировано 5 треков, а с фильтром 2.

Несмотря на результаты применения свёрточных нейронных сетей для фильтрации сигналов, при реконструкции параллельных треков оставалась ещё одна проблема – сигналы от треков вторичных непараллельных частиц. Их наличие тоже приводит к ложным реконструкциям. Были предприняты попытки фильтрации сигналов от таких треков с помощью свёрточной нейронной сети. Однако они не дали положительных результатов. Сигналы от таких треков либо не исключались, либо исключались сигналы от параллельных треков. Поэтому возникла необходимость в разработке нового метода, способного учитывать вторичные частицы.

Для решения этой проблемы разработан новый метод реконструкции на основе рекуррентных нейронных сетей. Идея работы такой сети заключается в следующем: Фиксируется один сигнал на первом сигнальном канале, а остальные исключаются (рис. 12). Каждый сигнальный канал (строка матрицы) представляет собой временной шаг, которые по очереди поступают на рекуррентную сеть, которая должна оставить только те сигналы, которые относятся к общему треку с фиксированным сигналом первого канала.

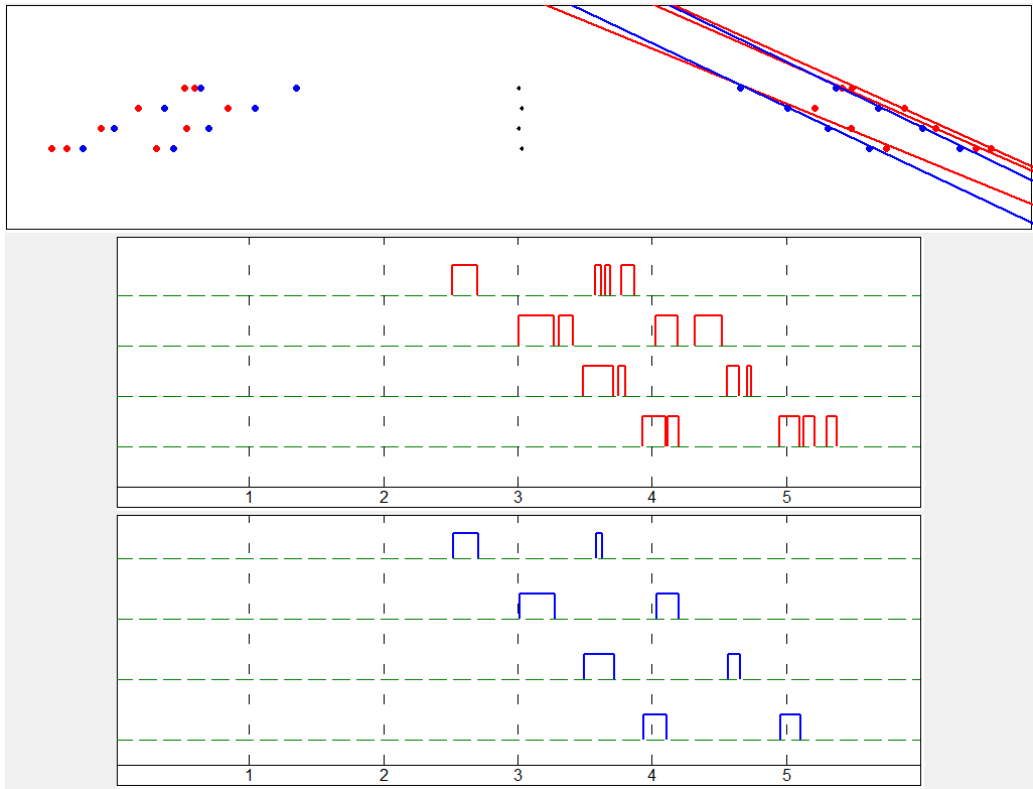


Рисунок 11. Пример работы фильтра на основе нейронных сетей.

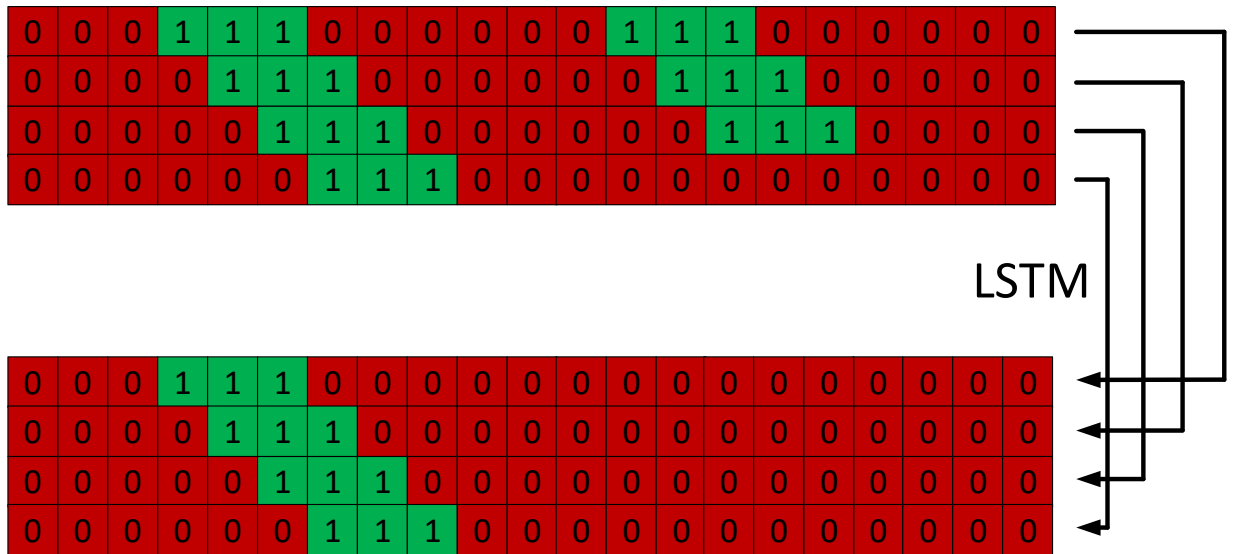


Рисунок 12. Принцип работы рекуррентной нейронной сети для выделения сигналов.

Такой метод позволяет рассортировать сигналы по трекам, что значительно упрощает их реконструкцию. На рисунке 13 показан пример работы такой нейронной сети. В верхней части показана временная развёртка события, а в центральной части показана та же развёртка, но с сигналами, распределёнными нейронной сетью. В нижней части рисунка показаны результаты реконструкции. Цвета точек и реконструированных прямых совпадают с цветами сигналов. Для первого (красного) сигнала в этом

событию соответствует два трека. Как видно, сеть отлично справилась с сегментацией сигналов по трекам в таком сложном событии.

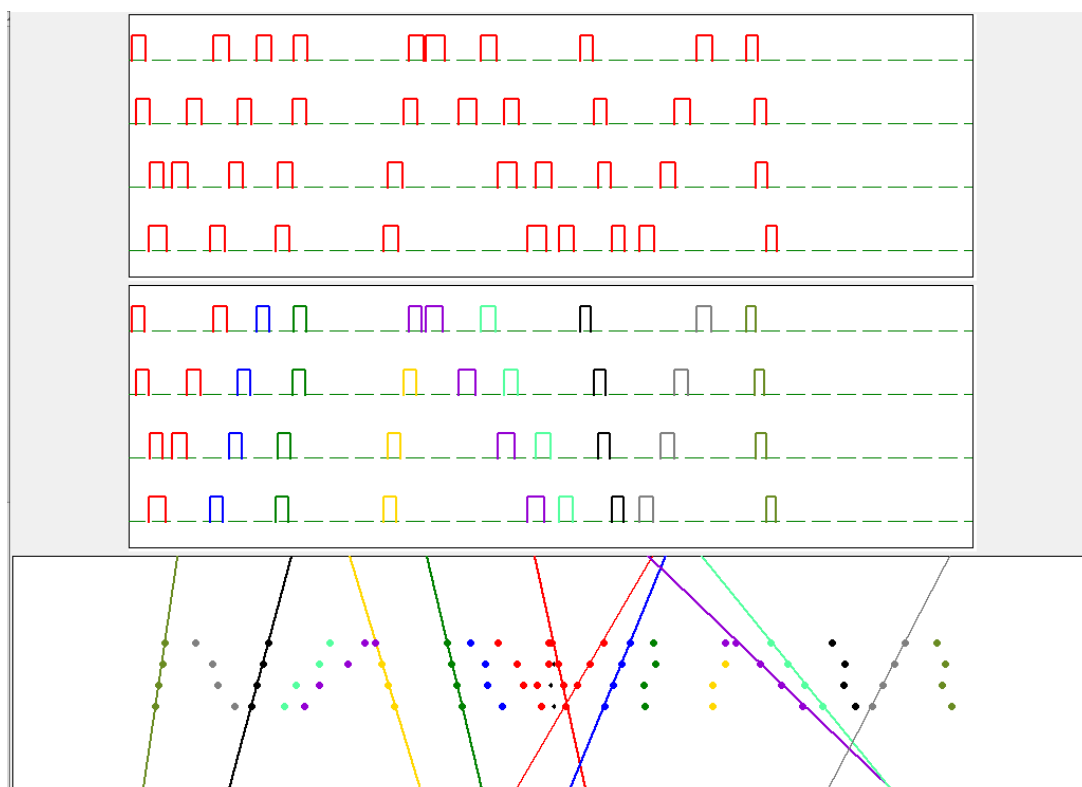


Рисунок 13. Реконструкция моделированного события с помощью рекуррентных нейронных сетей.

В таблице 1 показано сравнение результатов применения методов реконструкции к моделированным данным. В качестве сравниваемого параметра рассматривается стандартное отклонение распределения разности заданного в моделировании и реконструированного числа треков. Помимо параллельных треков, в этих событиях разыгрывались треки вторичных непараллельных частиц. Их число в отдельном событии разыгрывалось равномерно от 0 до 2. Как видно из таблицы, применение рекуррентной нейронной сети даёт более точный результат.

В главе 4 описываются результаты применения нового подхода к анализу многочастичных событий, полученных на установках ПротоТРЕК и КТУДК.

Во время применения нового подхода на основе искусственных нейронных сетей оказалось, что на экспериментальных данных он работает недостаточно удовлетворительно. Причина заключалась в том, что нейронные сети обучались на моделированных данных. Сравнивая отдельные моделированные и экспериментальные события, было выявлено, что в моделировании наблюдается слишком большое количество сигналов

как с большой длительностью (несколько сотен нс), так и с короткой (около 10 нс). Вероятнее всего это связано с тем, что в моделировании не учтены особенности работы усилителя-формирователя.

Таблица 1. Стандартные отклонения разности заданного в моделировании и реконструированного числа треков, полученные разными методами.

Множественность параллельных треков	Угол	Метод гистограммирования		Рекуррентная сеть
		Без фильтра	С фильтром	
3	0°	0.96	0.86	0.12
3	45°	1.14	1.19	0.73
5	0°	0.56	0.49	0.21
5	45°	1.89	1.25	1.00
7	0°	0.56	0.47	0.32
7	45°	2.47	2.07	1.15

Для решения этой проблемы было предложено использовать экспериментальные данные для обучения нейронных сетей. Идея схожа с моделированием: отобрать одночастичные события, из которых потом сформировать многочастичные. Алгоритм отбора выглядит следующим образом:

- 1) Реконструкция трека по первым сигналам на проволоках.
- 2) Если значение суммы квадратов отклонений меньше 10 мм^2 , то считать реконструкцию удовлетворительной.
- 3) Определение угла трека.
- 4) Определение ширины электронного облака, исходя из значения угла трека.
- 5) Если за пределами ширины облака больше нет сигналов, то считать событие одночастичным.
- 6) Все сигналы после первого считать послеимпульсами

Таким образом, было отобрано 3 млн. треков. Из одиночных треков составлен 1 млн. многочастичных событий с множественностью от 2 до 5. И фильтр на основе свёрточных нейронных сетей, и метод реконструкции на основе рекуррентных нейронных сетей были обучены на этих событиях.

Чтобы оценить работу нейронной сети, был выполнен визуальный анализ её применения к экспериментальным данным. Было визуально проанализировано 538 многочастичных событий. В результате анализа оказалось, что среди этих событий 95.8% полезных, т.е. с группами мюонов, в то время как применение метода гистограммирования давало лишь 61.9% полезных событий. Ошибка определения множественности даже для самых многочастичных событий не превышала 10%. Применение фильтра также позволило расширить исследуемый угловой диапазон до значений проекционного зенитного угла от 30° до 85°. Без этого диапазон составлял приблизительно от 50° до 85°.

В анализе многочастичных событий, зарегистрированных установкой ПротоТРЕК, были отобраны те наборы экспериментальных данных, в которых все 14 дрейфовые камеры имели удовлетворительное состояние. Всего за период с 10.06.2021 по 10.02.2022 было реконструировано 1863497 событий с множественностью треков в каждой плоскости от 3 и больше. Живое время работы установки для данного условия составило 1486.2 ч.

На рисунке 14 показаны распределения по множественности реконструированных треков для каждой плоскости. Обрыв спектра при множественности ~170 обусловлен разрешением дрейфовых камер. Такое значение числа реконструированных треков для плоскости эквивалентно ~24 трекам на камеру.

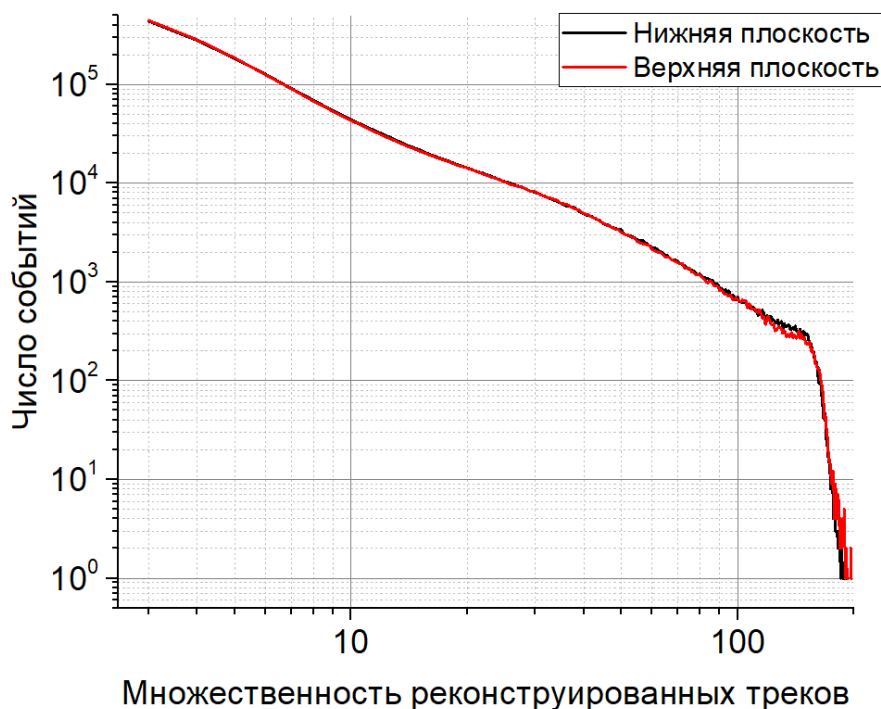


Рисунок 14. Распределение событий по множественности реконструированных треков для каждой плоскости ПротоТРЕК.

Отдельно исследовались события, в которых преимущественно параллельные треки, т.е. в каждой плоскости доля параллельных треков больше 0.5. На рисунке 15 показано распределение таких событий по множественности параллельных треков.

На рисунке 16 слева показана разница плотностей параллельных треков в отобранных событиях, а справа разница для всех частиц. Для определения плотности для всех частиц необходимо определить эффективную площадь камер, т.е. задать направление прихода частиц. Для этого среди всех событий рассматривались те, в которых число параллельных треков, вне зависимости от их доли, на каждой плоскости составляло минимум 3. Дискретность распределения (особенно выделяющаяся вблизи нуля) обусловлена дискретностью числа частиц. Как видно из рисунка, плотность параллельных треков в отобранных событиях лучше согласуется между плоскостями, чем плотность всех событий. Большой разброс разности для всех треков может объясняться как ложными реконструкциями, так и образованием или поглощением частиц в пределах установки.

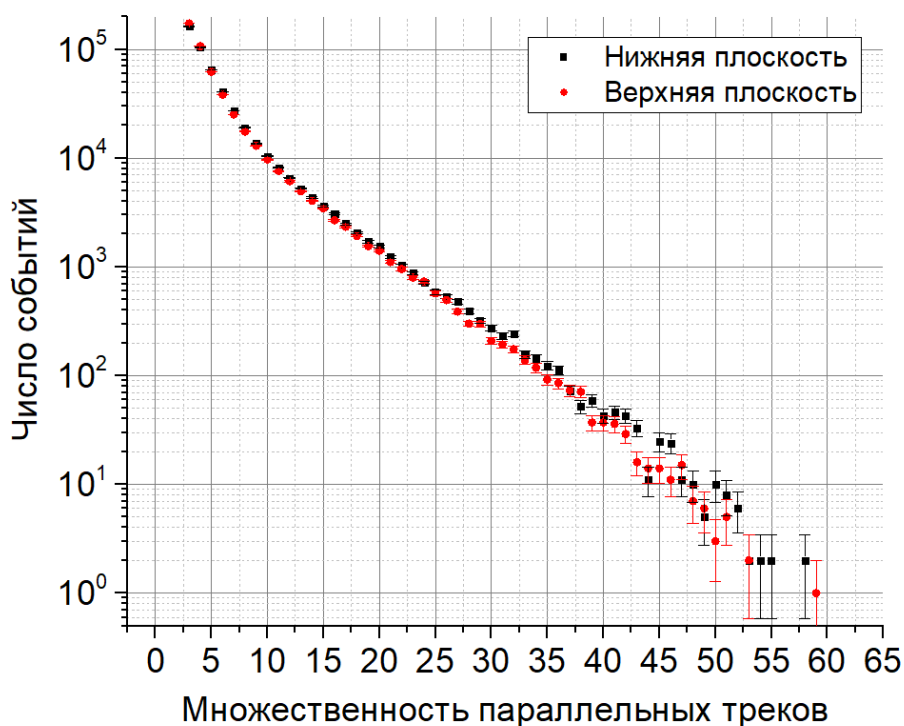


Рисунок 15. Распределения по множественности параллельных треков.

В таблице 2 представлена зависимость статистических параметров распределений разности плотностей параллельных треков для разных диапазонов. Как видно, средняя разница увеличивается с ростом плотности частиц в сторону нижней плоскости. Такое смещение также может объясняться образованием вторичных частиц в пределах установки. Исходя

из этой зависимости, систематическое смещение среднего имеет значение 10%.

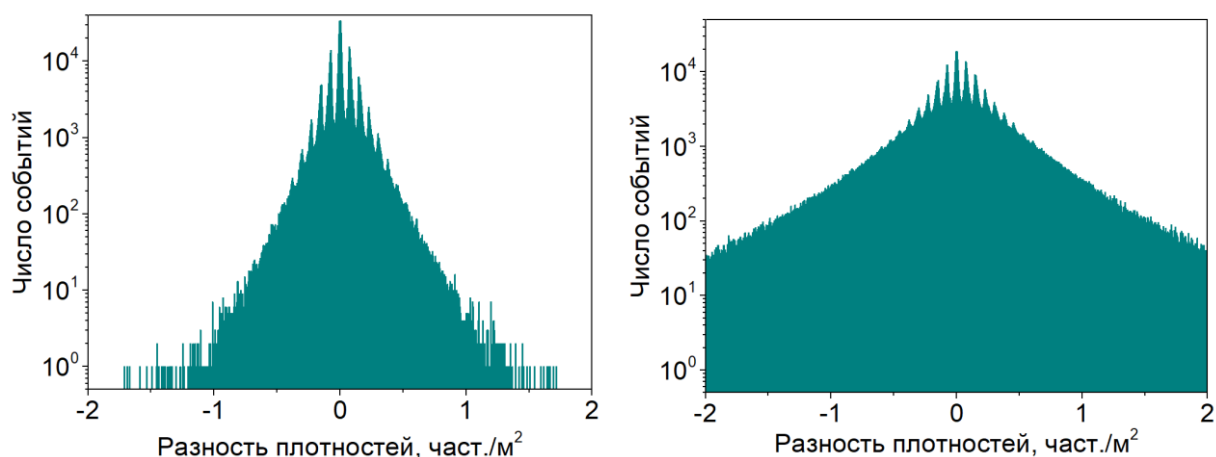


Рисунок 16. Распределения по разности плотностей частиц между нижней и верхней плоскостями для параллельных треков (слева) и всех треков (справа).

Таблица 2. Зависимость статистических параметров разницы плотностей параллельных треков от диапазона плотности на нижней плоскости.

Диапазон плотностей, част./м ²	Средняя разность, част./м ² ×10 ⁻³	Стандартное отклонение, част./м ²
0.2-0.3	$-(403\pm 4)\times 10^{-1}$	0.06
0.3-0.4	$(31\pm 3)\times 10^{-1}$	0.10
0.4-0.5	$(315\pm 5)\times 10^{-1}$	0.13
0.5-0.6	$(510\pm 8)\times 10^{-1}$	0.16
0.6-0.7	$(553\pm 9)\times 10^{-1}$	0.18
0.7-0.8	72±1.3	0.2
0.8-0.9	78±1.7	0.2
0.9-1.0	84±2	0.2
1.0-1.5	117±1.3	0.3
1.5-2.0	152±3	0.3
2.0-5.0	240±3	0.4

С применением новой методики был выполнен анализ событий с группами мюонов, зарегистрированных установкой КТУДК за период с 22.03.2017 по 17.04.2019. При этом исследовались совместные события с ДЕКОР. На рисунке 17 показаны результаты анализа плотности мюонов. Для определения эффективной площади КТУДК брались значения углов, полученных по данным ДЕКОР. Как видно из графиков, результаты

реконструкции совместных событий КТУДК и ДЕКОР хорошо согласуются за исключением самых высоких плотностей. В таких событиях в ДЕКОР возможен избыток треков из-за большого количества вторичных частиц и прохождения группы почти вдоль детектора, в КТУДК могут недосчитываться треки из-за некорректной работы старого ВЦП.

Согласно методу спектров локальной плотности мюонов [10], средний логарифм энергии первичных ядер описывается следующей приближённой формулой [15]:

$$\langle \lg(E, \text{ГэВ}) \rangle \approx 7.03 + 1.07 \lg(D, \text{м}^{-2}) + 3.80 \lg(\sec(\theta)), \quad (1)$$

где D – средняя плотность мюонов в группе, θ – зенитный угол направления прилёта группы. Используя плотность мюонов по данным КТУДК и зенитный угол по данным ДЕКОР, получаем оценку энергий первичных ядер, ответственных за генерацию этих групп от $10^{15.5}$ до $10^{18.0}$ эВ.

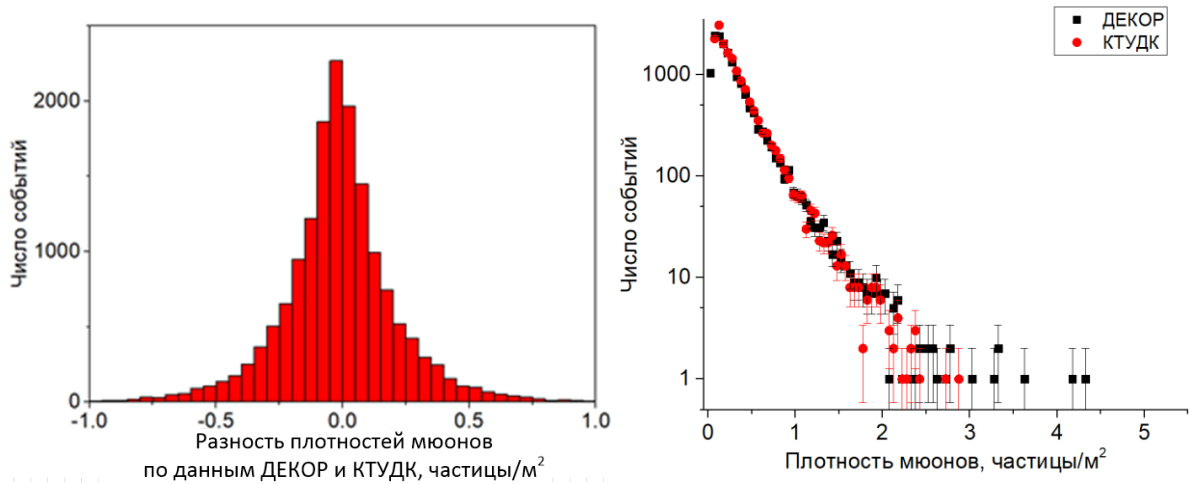


Рисунок 17. Слева: разница плотностей мюонов. Справа: распределение по плотности мюонов.

На крупномасштабном детекторе ТРЕК будут исследоваться события как с малой плотностью мюонов ($\sim 10^{-2}$ частиц/м²), так и с большой (выше 10 частиц/м²). В первом случае плотность на порядок ниже, чем регистрировались на КТУДК, что согласно формуле (1) позволит расширить исследуемый энергетический диапазон на порядок в область более низких энергий. События с высокой плотностью мюонов стало возможно исследовать за счёт нового ВЦП и методов анализа на основе нейронных сетей. Аналогичным образом это позволит на порядок расширить исследуемый энергетический диапазон в более высокую область энергий. Таким образом, с помощью одного координатно-трекового детектора ТРЕК будут изучаться космические лучи в рекордно широком диапазоне энергий 10^{14} - 10^{19} эВ.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

- 1) Разработан новый многоканальный время-цифровой преобразователь на основе FPGA Altera Cyclone V. Тестирование показало, что ВЦП имеет точность лучше (5 нс), чем временное разрешение дрейфовой камеры (25 нс), и полностью удовлетворяет требованиям системы регистрации детектора ТРЕК.
- 2) Разработана регистрирующая система и сервер-клиентские программы для координатно-трековой установки ПротоТРЕК, обеспечивающая синхронизацию работы время-цифровых преобразователей.
- 3) Разработан фильтр послеимпульсов на основе свёрточных нейронных сетей. Нейронная сеть была обучена на моделированных событиях, полученных с помощью Garfield++. На тестовой выборке нейронная сеть исключила 85% послеимпульсов, что значительно улучшило точность работы аналитического метода реконструкции.
- 4) Разработан метод сегментации сигналов по трекам на основе рекуррентных нейронных сетей, позволяющий реконструировать сложные события, в которых сигналы от разных треков сливаются.
- 5) Впервые новый подход к обработке данных на основе методов глубокого обучения был применён к реконструкции многочастичных событий, регистрируемых многопроволочными дрейфовыми камерами в космических лучах. В ходе визуального анализа экспериментальных событий было выявлено, что среди отобранных нейронной сетью событий – 95.8% полезных с группами мюонов. Ошибка определения множественности не превышает 10%.
- 6) Новый подход на основе методов глубокого обучения был применён к экспериментальным данным ПротоТРЕК. Анализ одночастичных событий показал в первую очередь, что синхронизация новых ВЦП выполняется корректно. Анализ многочастичных событий показал, что многопроволочные дрейфовые камеры позволяют регистрировать и реконструировать события с множественностью до 24 треков на камеру.
- 7) Выполнено сравнение реконструкций многочастичных событий по данным КТУДК и ДЕКОР. Результаты измерения плотностей мюонов хорошо согласуются в 90% случаях. Выполненное моделирование регистрации параллельных треков комплексом КТУДК-ДЕКОР и выводы метода спектров локальной плотности мюонов показали, что за эти экспериментальные события ответственны первичные космические лучи со средним значением логарифма энергии $15.5 \leq \langle \log(E), \text{эВ} \rangle \leq 18.0$.

- 8) Разработанный аппаратно-программный комплекс позволит исследовать космические лучи на крупномасштабном детекторе ТРЕК в рекордно широком диапазоне энергий $10^{14} \leq E \leq 10^{19}$ эВ.

Список литературы

- 1) H.P. Dembinski et al. Report on tests and measurements of hadronic interaction properties with air showers. *EPJ Web Conf.* **210**, 02004 (2019).
- 2) A.A. Petrukhin. Muon puzzle in cosmic ray experiments and its possible solution. *Nuclear Instruments and Methods in Physics*, **742**, P 228-231 (2014).
- 3) I.I. Yashin et al. NEVOD — An experimental complex for multi-component investigations of cosmic rays and their interactions in the energy range 1– 10^{10} GeV. *JINST* **16** T08014 (2021).
- 4) E.A. Zadeba et al. The coordinate-tracking detector based on the drift chambers for ultrahigh-energy cosmic ray investigations *JINST*. V. **9** P. C08018 (2014).
- 5) V. Avati et al. Cosmic multi-muon events observed in the underground CERN-LEP tunnel with the ALEPH experiment. *Astroparticle Phys.* **19**, 513-523 (2003).
- 6) J. Abdallah et al. Study of multi-muon bundles in cosmic ray showers detected with the DELPHI detector at LEP. *Astroparticle Phys.* **28**, 273-286 (2007).
- 7) H.G.S. Wilkens. Electron and muon densities in cosmic rays measured at L3+C. *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)* **122**, 297-300 (2003).
- 8) The ALICE collaboration. Study of cosmic ray events with high muon multiplicity using the ALICE detector at the CERN Large Hadron Collider **JCAP01**, 032 (2016).
- 9) D. Soldin. Update on the combined analysis of muon measurements from nine air shower experiments. *PoS(ICRC2021)*, 349 (2021).
- 10) А.Г. Богданов и др. Исследование характеристик потока и взаимодействия космических лучей сверхвысоких энергий с помощью метода спектров локальной плотности мюонов. *Ядерная физика*, **73**, № **11**, с. 1904-1920 (2010).
- 11) N.I. Bozhko et al. Drift chamber for the Serpukhov neutrino detector. *Nucl. Instrum. Meth. A*, V **243**, Issues 2-3, P 388-394 (1986).
- 12) L.S. Varabash et al. The IHEP–JINR neutrino detector at neutrino beams of the U-70 accelerator (Protvino). *Instruments and Experimental Techniques* **46**, 300–326 (2003).

- 13) V.S. Vorobev et al. The FPGA time-to-digital converter for the large-scale detector TREK based on multi-wire drift chambers. *Journal of Instrumentation*, **15** C08007 (2020).
- 14) <https://garfieldpp.web.cern.ch/> - сайт программного обеспечения Garfield++ (дата обращения 17.01.2022).
- 15) И.И. Яшин и др. Исследование формы энергетического спектра ПККИ методом локальной плотности мюонов ШАЛ. *Известия РАН. Сер. физ.* **73**, 616-619 (2009).

Результаты исследований опубликованы в следующих основных работах:

Основные положения диссертации опубликованы в 7 работах:

1. **Vorobyev V.S.** et al. Methods of reconstruction of multi-particle events in the new coordinate-tracking setup. *J. Phys.: Conf. Ser.* V. 945, 012027. 2018 (**Scopus, WoS**).
2. **Vorobyev V.S.** et al. Application of drift chambers for research of cosmic-ray muon bundles. *Phys. Atom. Nucl.*, 81(9), 1325–1331. 2018 (**Scopus, WoS**)
3. **Vorobev V.S.** et al. The FPGA time-to-digital converter for the large-scale detector TREK based on multi-wire drift chambers. *J. Instrumentation*, 15(8). 2020 (**Scopus, WoS**).
4. Nikolaenko R.V. ... **Vorobev V.S.** et al. Modeling the TREK detector's response when detecting muon bundles from ultra-high energy primary cosmic rays. *Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics.* 85, pages 438–440 2021 (**Scopus**)
5. **Vorob'ev V.S.** et al. Application of deep learning techniques for multiparticle track reconstruction of drift chamber data. *Phys. Atom. Nucl.* 84, 1567–1571. 2021. (**Scopus, WoS**).
6. **Vorob'ev V.S.** et al. Multiparticle event reconstruction using deep learning methods for coordinate-tracking unit based on drift chambers. *Phys. Atom. Nucl.* 84, 1780–1788. 2021 (**Scopus, WoS**).
7. **Vorobev V.S.**, Petrukhin, A.A. Review of investigations of muon bundles generated by very-high-energy cosmic rays. *Phys. Atom. Nucl.* 84, 934–940. 2021 (**Scopus, WoS**).