

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

УДК 539.121.667

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**Моделирование регистрации широких атмосферных ливней в области
сверхвысоких энергий прототипом детектора ТРЕК**

Научный руководитель

доц., к.ф.-м.н.

_____ Е. А. Задеба

Студент

_____ Р. В. Николаенко

Москва 2020

Содержание

1	Введение	3
1.1	Метод СЛПМ	3
1.2	Детектор ТРЕК	6
1.3	ПротоТРЕК	7
1.4	Программный комплекс для моделирования регистрации ШАЛ детектором на дрейфовых камерах	9
1.5	Цель работы	11
2	Моделирование регистрации ШАЛ в области сверхвысоких энергий детектором на дрейфовых камерах	12
2.1	Создание модели ПротоТРЕК	12
2.2	Отбор регистрируемых событий	13
2.3	Параметры моделирования	15
2.4	Результаты моделирования	16
3	Заключение	24
	Список использованных источников	25

1 Введение

В ряде экспериментов по регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ) наблюдается избыток групп мюонов, генерируемых первичными космическими лучами (ПКЛ) с энергией выше 10^{17} эВ (т.н. "мюонная загадка") [1]. Актуальность этой проблемы подчеркивается созданием международной группы WHISP [2], включающей представителей ключевых экспериментов, регистрирующих многомюонные события от первичных космических лучей сверхвысоких энергий (Pierre Auger, IceCube, НЕВОД и др.). Комплекс НЕВОД-ДЕКОР [3], включающий черенковский водный детектор объемом 2000 м^3 и координатно-трековый детектор ДЕКОР площадью 70 м^2 , позволяет исследовать энергетический интервал ПКЛ от 10^{15} до 10^{18} эВ. Для дальнейшего расширения этого диапазона в экспериментальном комплексе НЕВОД создаётся крупнейший в мире координатно-трековый детектор широких атмосферных ливней ТРЕК [5,6] на основе многопроволочных дрейфовых камер (ДК), имеющий площадь 250 м^2 . Методы работы с новым детектором, алгоритмы реконструкции событий и программное обеспечение для моделирования работы установки отлаживаются на прототипе детектора ТРЕК, получившем прозаичное название ПротоТРЕК.

1.1 Метод СЛПМ

Мюоны давно стали удобным инструментом в различных исследованиях. В ускорительных экспериментах мюонные детекторы всегда являются важной частью установки, они позволяют хорошо идентифицировать частицы, в результате распада которых образуются мюоны. Однако наибольшее развитие физика мюонов получила в исследованиях космических лучей, как в фундаментальных (область высоких и сверхвысоких энергий), так и прикладных (область энергий до $\sim 100 \text{ ГэВ}$) направлениях. В области высоких и сверхвысоких энергий эти частицы используются для исследо-

вания процессов их генерации и определения энергетического спектра и массового состава первичных космических лучей.

Одной из важнейших проблем, возникающих при проектировании установок по регистрации мюонной компоненты ШАЛ, является обеспечение как можно более широкого диапазона энергий частиц ПКЛ.

Существенное увеличение энергетического интервала при регистрации групп мюонов детектором небольшой площади стало возможным благодаря использованию метода спектров локальной плотности мюонов [7] (СЛПМ), измеряемых в широком интервале зенитных углов. С ростом зенитного угла довольно быстро увеличивается поперечный разлёт мюонной компоненты ШАЛ (может достигать десятков километров), который определяет площадь, с которой возможен набор событий с группами мюонов. Этого вполне достаточно для получения хорошей статистики в области сверхвысоких энергий первичных частиц. Локальная плотность мюонов D в событии оценивается как отношение числа частиц m , попавших в детектор, к его площади S для данного направления прихода группы. Вклад в события с одинаковой плотностью дают ливни от ПКЛ разных энергий, регистрируемые на разных расстояниях от оси. Однако, как показывают результаты моделирования, из-за круто падающего спектра ПКЛ эффективный интервал энергий для данного зенитного угла оказывается относительно узким. С ростом зенитного угла плотность потока мюонов вследствие их разлёта, поглощения и распада уменьшается, поэтому группам с одинаковой плотностью, но разными зенитными углами, будут соответствовать разные энергии первичных частиц. Таким образом, измерение множественности мюонов и зенитного угла позволяет оценивать энергию генерирующих их первичных частиц космических лучей.

На данный момент единственной в мире установкой, предназначенной для изучения наклонных ($\theta = 30^\circ - 90^\circ$) групп мюонов на поверхности Земли, является координатно-трековый детектор ДЕКОР, входящий в состав экспериментального комплекса НЕВОД и позволяющий охватывать диапазон ПКЛ $10^{15} - 10^{18}$ эВ. Результаты обработки накопленной за время работы детектора базы данных и произведённых на основе моделирования расчётов приведены на Рисунке 1. Видно, что число групп мюонов

под большими зенитными углами превышает расчётные значения даже для предположения о чисто железном спектре ПКЛ. Этот результат впоследствии был подтверждён на установке Pierre Auger.

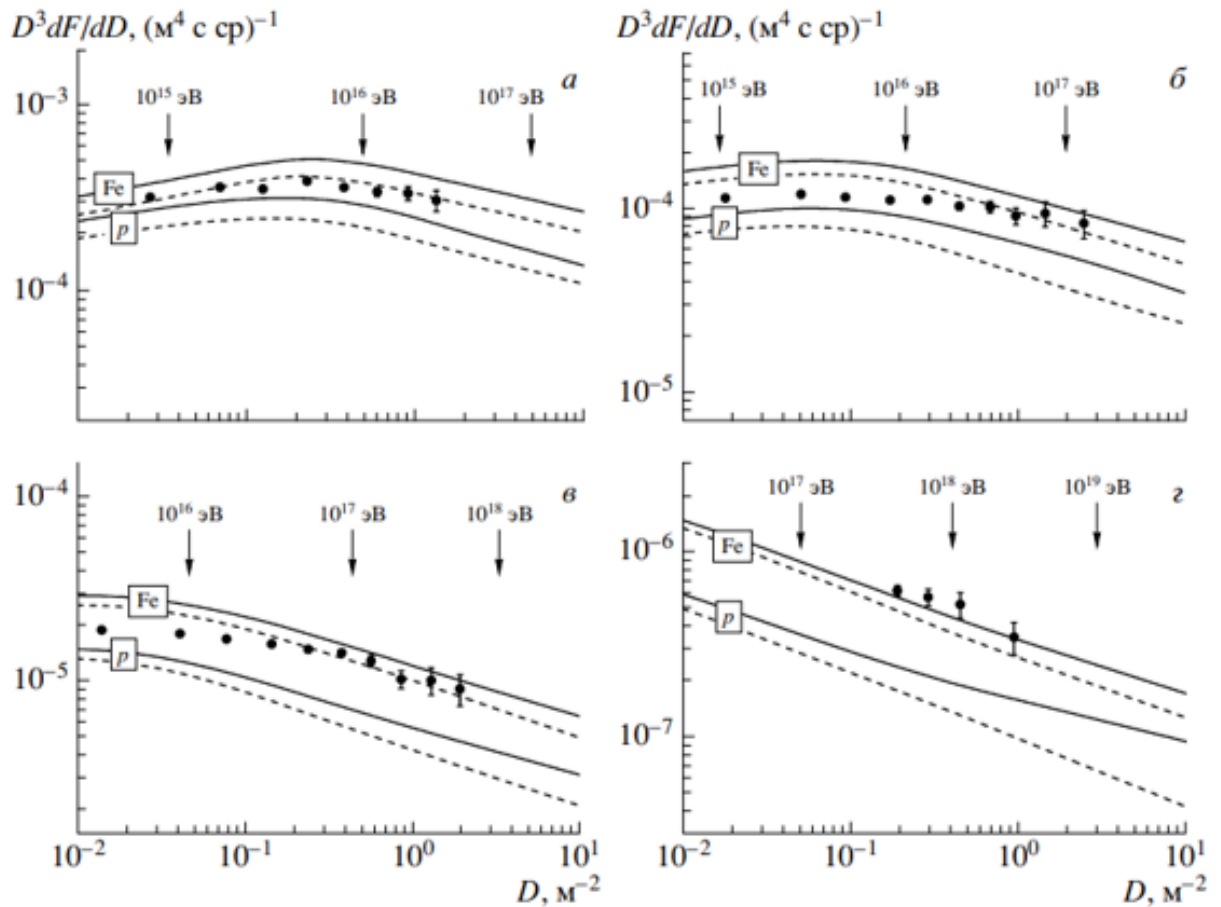


Рисунок 1 — Экспериментальные и расчетные дифференциальные спектры локальной плотности мюонов для зенитных углов 35° (а), 50° (б), 65° (в) и 78° (г). Точки — экспериментальные данные; сплошные и штриховые кривые — расчет с моделями QGSJET01 и SIBYLL 2.1 соответственно. Нижние пары кривых на каждом рисунке — первичные протоны, верхние — ядра железа

Детектор ТРЕК позволит расширить исследуемый диапазон энергий первичных частиц космических лучей до $10^{14} - 10^{19}$ эВ, что впервые даст возможность покрыть весь диапазон энергий ПКЛ, в котором наблюдается аномалия числа многомюонных событий, в рамках одной установки.

1.2 Детектор ТРЕК

Детектор ТРЕК располагается в защитной пристройке на внешней стене здания НЕВОД. Всего в детектор ТРЕК будут установлены 264 дрейфовые камеры, по 132 в две каждой плоскости детектора. В одной плоскости камеры размещены вертикально, в другой – горизонтально; такая конфигурация позволяет реконструировать пространственные углы регистрируемой группы частиц. На Рисунке 2 представлена схема расположения детектора ТРЕК относительно других установок комплекса НЕВОД.

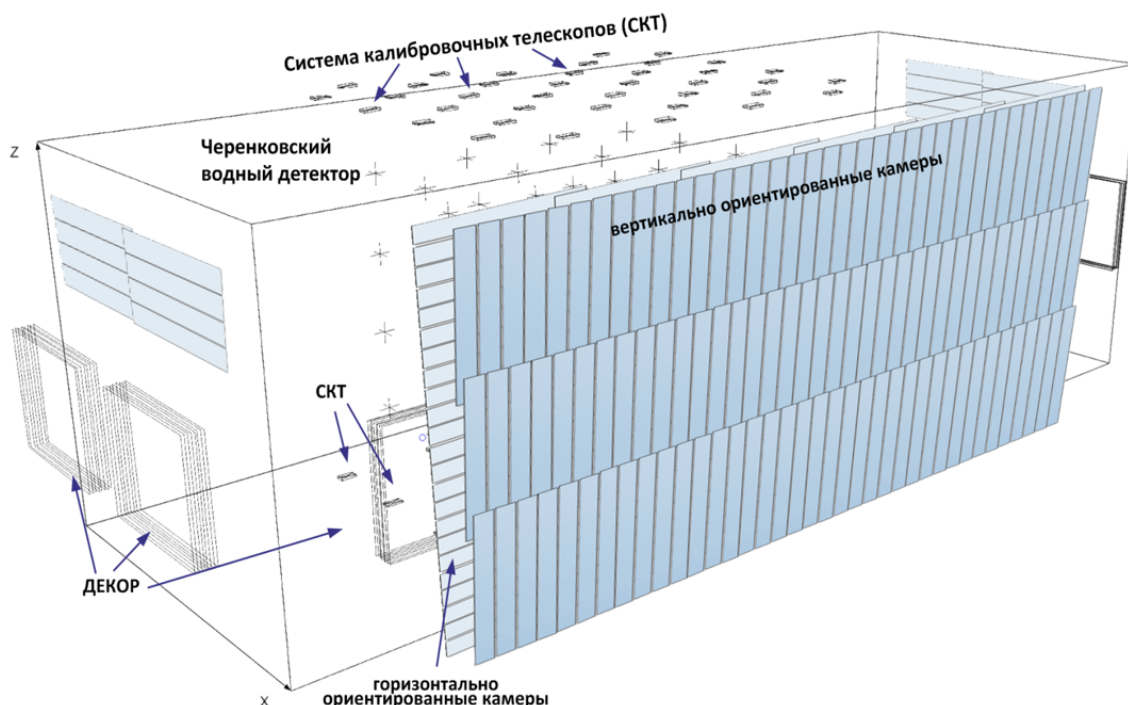


Рисунок 2 – Схематическое расположение детектора ТРЕК относительно других детекторов комплекса - ДЕКОР, СКТ, ЧВД и установки КТУДК (на торцах ЧВД, над супермодулями ДЕКОР)

В детекторе ТРЕК используются дрейфовые камеры Нейтринного Детектора ИФВЭ-ОИЯИ [8], Рисунок 3.

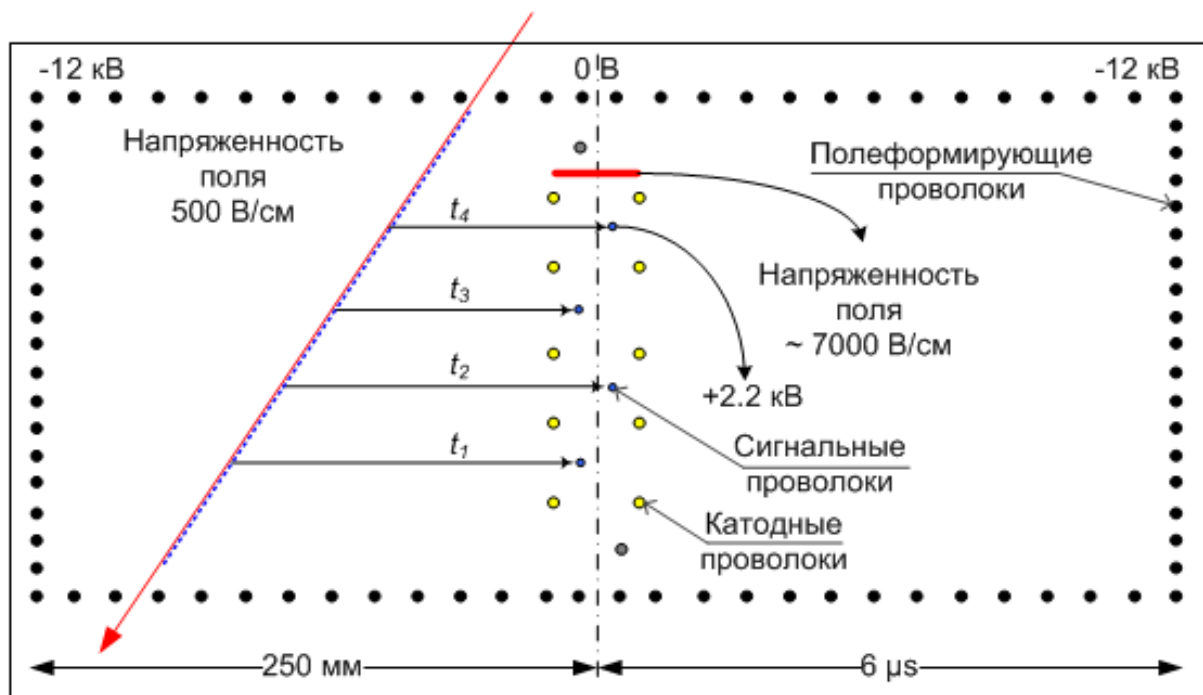


Рисунок 3 — Схематичное поперечное сечение дрейфовой камеры

Таблица 1 — Характеристики дрейфовых камер ИФВЭ

Размеры	$4000 \times 508 \times 112 \text{ мм}^3$
Активная поверхность	$3.7 \times 0.5 \text{ м}^2$
Скорость дрейфа	$\sim 41.6 \text{ мкм/нс}$
Координатная точность	$\sim 1 \text{ мм}$
Угловая точность	$\sim 1.7^\circ$
Состав используемой газовой смеси	$94\% \text{ Ar} + 6\% \text{ CO}_2$

1.3 ПротоТРЕК

Первым прототипом детектора ТРЕК была установка КУТДК [9, 10] (Координатно-трековая установка на дрейфовых камерах). Целями КТУДК являлись исследование возможностей совместной работы дрейфовых камер с прочими установками экспериментального комплекса НЕВОД, разработки методов реконструкции событий и электроники. Однако расположение дрейфовых камер в плоскостях КТУДК позволяет реконструировать лишь одну проекцию зенитного угла треков частиц. Поэтому был создан новый

детектор на дрейфовых камерах, ПротоТРЕК [11].

ПротоТРЕК представляет из себя две горизонтальные плоскости из 7 дрейфовых камер, расположенные одна над другой, Рисунок 4. Камеры верхней плоскости повёрнуты относительно нижних на 90 градусов, что позволяет реконструировать обе проекции углов группы частиц, а сами плоскости расположены под наклоном в 4.6 градуса относительно земли в соответствии с их наклоном для размещения внахлёт в детекторе ТРЕК, Рисунок 4. В качестве триггера используется схема совпадения по двум сцинтилляционным счетчикам, расположенным над и под плоскостями детектора.

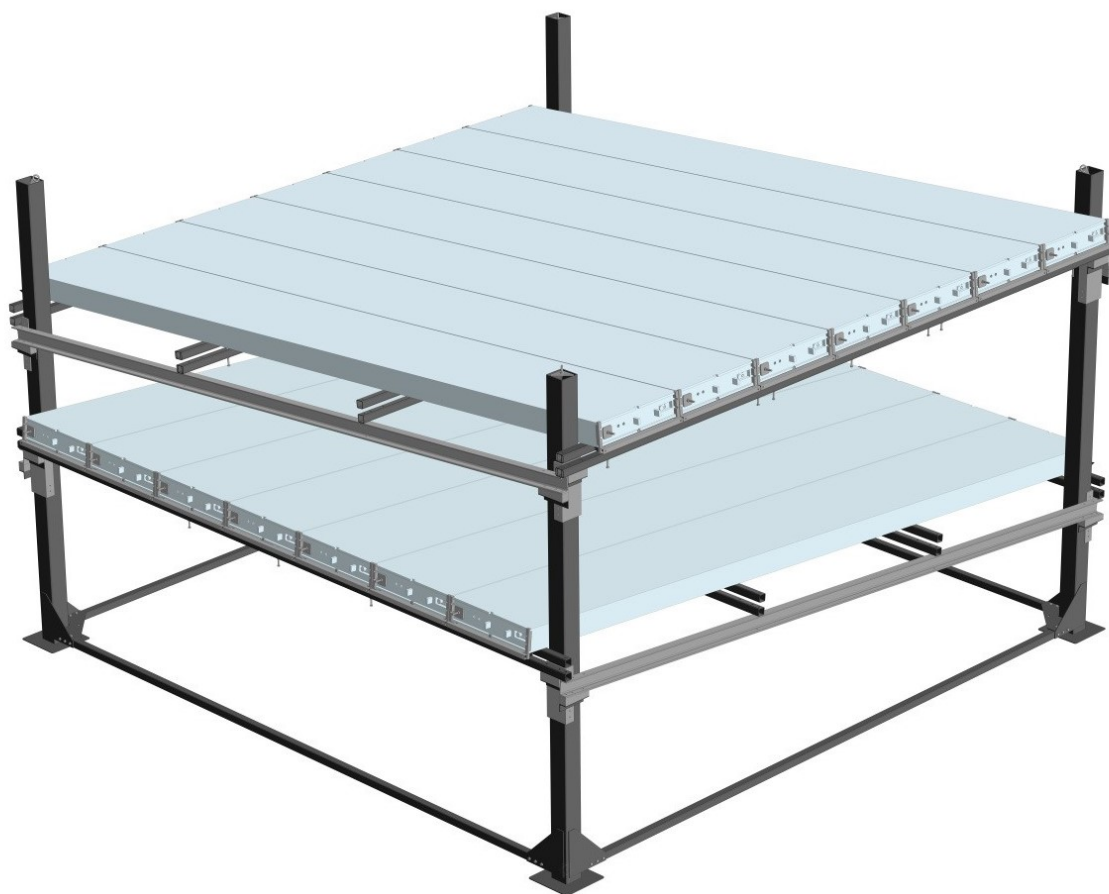


Рисунок 4 — Модель рамной конструкции ПротоТРЕК с расположенными на ней дрейфовыми камерами, выполненная в САПР Компас-3D

Набранная детектором статистика уже позволяет проводить анализ околоразвертикального потока частиц ШАЛ, а в будущем, с запуском детектора ТРЕК, эта установка продолжит дополнять его данные в диапазоне

малых зенитных углов.

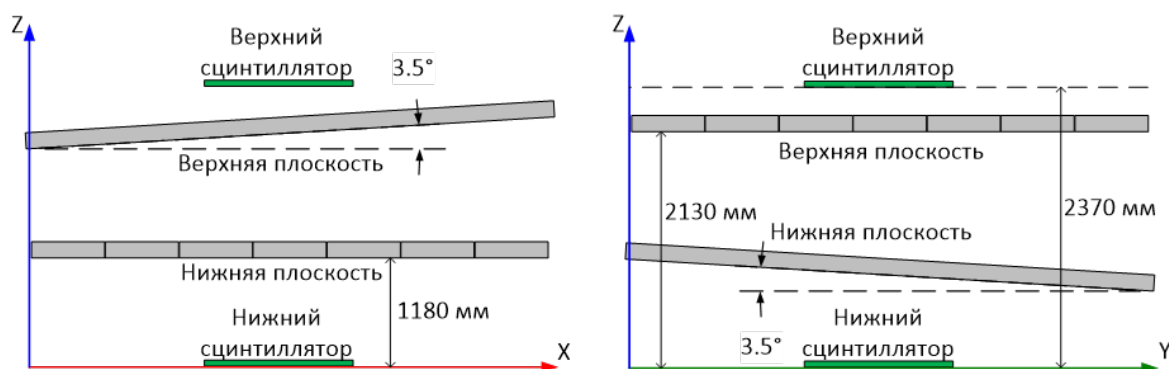


Рисунок 5 — Схема расположения дрейфовых камер и сцинтилляционных счётчиков ПротоТРЕК

1.4 Программный комплекс для моделирования регистрации ШАЛ детектором на дрейфовых камерах

Для интерпретации экспериментальных данных детектора ТРЕК, учета конфигурационных особенностей детектора, влияния на его отклик вторичных частиц, образовавшихся во взаимодействиях частиц ливня с веществом конструкций, окружающих детектор, а для также отработки методов реконструкции и анализа регистрируемых событий создан комплекс программ для моделирования всего процесса регистрации групп мюонов от первого взаимодействия первичных космических лучей с атмосферой Земли до формирования сигнала электроникой ДК. Комплекс состоит из трёх основных стадий моделирования, представленными программами CORSIKA [12], Geant4 [13,14] и Garfield++ [15]. На Рисунке 6 приведена блок-схема программного комплекса, с дополнительной информацией о типах файлов, создаваемых в процессе работы комплекса. Весь процесс моделирования регистрации ШАЛ детектором на дрейфовых камерах при фиксированных заданных параметрах спектра, типа первичных частиц, минимальных значений энергии частиц при моделировании прохождения ШАЛ через атмосферу, конфигурации геометрии в Geant4 и настроек сбо-

ра данных называется *циклом* моделирования. Совокупность циклов моделирования, осуществлённых для нескольких заданных интервалов энергии первичных частиц и/или нескольких типов первичных частиц, результаты которых объединяются с учётом эквивалентного времени набора статистики для каждого интервала первичных энергий, называется *суперциклом* моделирования. Приблизительное время осуществления суперцикла (при использовании вычислительных мощностей Высокопроизводительного Центра НИЯУ МИФИ) составляет 2-6 месяцев.

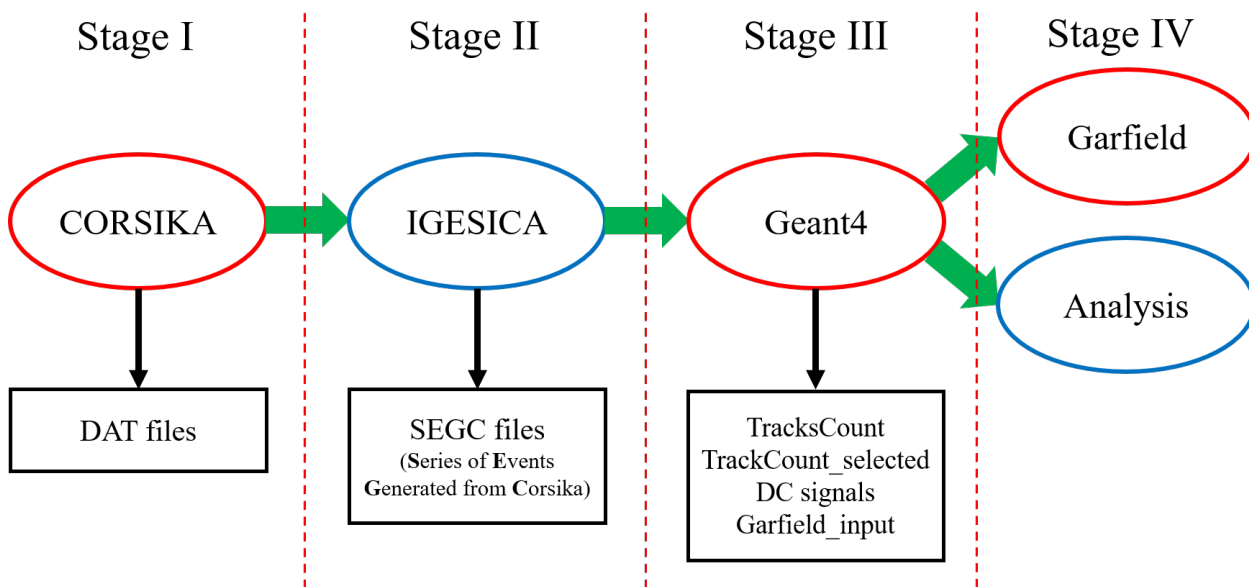


Рисунок 6 — Блок-схема программного комплекса для моделирования отклика детектора ТРЕК при регистрации ШАЛ. Описывается один цикл моделирования

Программный комплекс реализован для моделирования не только детектора ТРЕК, но и его прототипа. Вообще, данный комплекс легко адаптировать для моделирования любого детектора, чьи размеры можно считать точечными по сравнению с сечением ШАЛ. Принципиальное отличие конфигурации для моделирования работы ПротоТРЕК заключается лишь в размерах ячейки матрицы разбиения фронта ливня, задаваемых в алгоритме IGESICA. Данная процедура позволяет избежать лишних временных затрат на вычисления и эффективнее использовать данные программы CORSIKA.

1.5 Цель работы

Наличие экспериментальных данных детектора ПротоТРЕК позволяет протестировать работу программного комплекса, отладить общую методику столь объёмного и трудоёмкого моделирования, а также оценить упущения и неточности в используемых моделях. Результаты моделирования, с другой стороны, должны помочь в интерпретации данных установки и проверке алгоритмов реконструкции событий. Работа в течение семестра была направлена на проведение первого суперцикла моделирования регистрации ШАЛ прототипом детектора ТРЕК. Поставленная задача требует создания модели ПротоТРЕК в среде Geant4 и алгоритмов для осуществления отбора и анализа событий, аналогичных работе реального детектора. Основные задачи также включают в себя отладку работы комплекса, набор данных моделирования регистрации ШАЛ в диапазоне энергий $10^{14} - 10^{17}$ эВ, создание алгоритмов для обработки результатов и сравнение полученных зависимостей с имеющимися экспериментальными данными детектора.

2 Моделирование регистрации ШАЛ в области сверхвысоких энергий детектором на дрейфовых камерах

2.1 Создание модели ПротоТРЕК

Ввиду наличие САПР-модели рамы для крепления дрейфовых камер, её геометрия перенесена в Geant4 посредством хорошо отлаженной в процессе создания модели детектора ТРЕК схемы – трансляция в физическое тело в Geant4 через библиотеку CADMesh [16]. Задание дрейфовых камер также осуществлено идентично модели детектора ТРЕК. Стены и крыша временного монтажного модуля (ВММ) воссозданы с учетом их слоевой структуры. На рисунке 7 показано отображение геометрии рамы и дрейфовых камер ПротоТРЕК в графическом интерфейсе Geant4.

Моделирование работы дрейфовых камер происходит следующим образом. В Geant4 помимо корпуса, газового объёма, проволочек и пробок из оргстекла для их крепления внутри каждой камеры задаются четыре плоскости, в которых лежат сигнальные проволочки. Так как по своей физической сущности плоскости не отличаются от газа, заполняющего объём камеры, они не влияют на прохождение частицы через камеру, но позволяют определять координаты, в которых трек частиц пересёк плоскость. Используемое в данном моделировании упрощение работы дрейфовых камер заключается в трактовке точки пересечения трека с плоскостью сигнальной проволочки как точки ионизации, с которой начался дрейф электронов с постоянной скоростью до момента возникновения сигнала в проволочке. Данный подход обеспечивает достаточную точность моделирования сигнала дрейфовых камер и может, при необходимости, учитывать результаты

более точных расчётов путём соответствующих коррекций.

Собираемая таким образом информация о прохождении группы частиц через дрейфовые камеры позволяет проводить реконструкцию события, аналогичную используемой для обработки данных реальной установки. Безусловным преимуществом моделирования является, разумеется, однозначная идентификация регистрируемых частиц и отсутствие левой-правой неоднозначности при реконструкции трека. Благодаря этому, при помощи моделирования можно точно определить вклад вторичных частиц в общее число зарегистрированных треков, эффективность регистрации частиц установкой и влияние различных факторов на эти две величины.

2.2 Отбор регистрируемых событий

Алгоритм IGESICA генерирует события регистрации группы частиц ШАЛ, соответствующие всем возможным вариантам расположения детектора по фронтом ливня. Таким образом возможно учитывать геометрическую вероятность регистрации ШАЛ (ведь, чем больше сечение ливня, тем выше вероятность его зарегистрировать), а также значительно быстрее получать зависимость отклика установки от ее расположения относительно оси ливня. Однако правильная картина может иметь место лишь при условии, что из всех возможных событий остаются лишь отобранные в соответствии с критериями отбора, используемыми при накоплении экспериментальной статистики. Для регистрации события необходимо срабатывание обоих сцинтилляторов.

Критерии отбора событий:

- 1) Параллельными считаются треки, лежащие в угловом интервале ± 5 градусов;
- 2) Множественность параллельных треков на каждой плоскости должна быть не менее трёх;
- 3) Доля параллельных треков на каждой плоскости должна быть не более 50%.

Информация об отобранных событиях, а именно, номер события, величины азимутального и зенитных углов, энергии первичной частиц, число

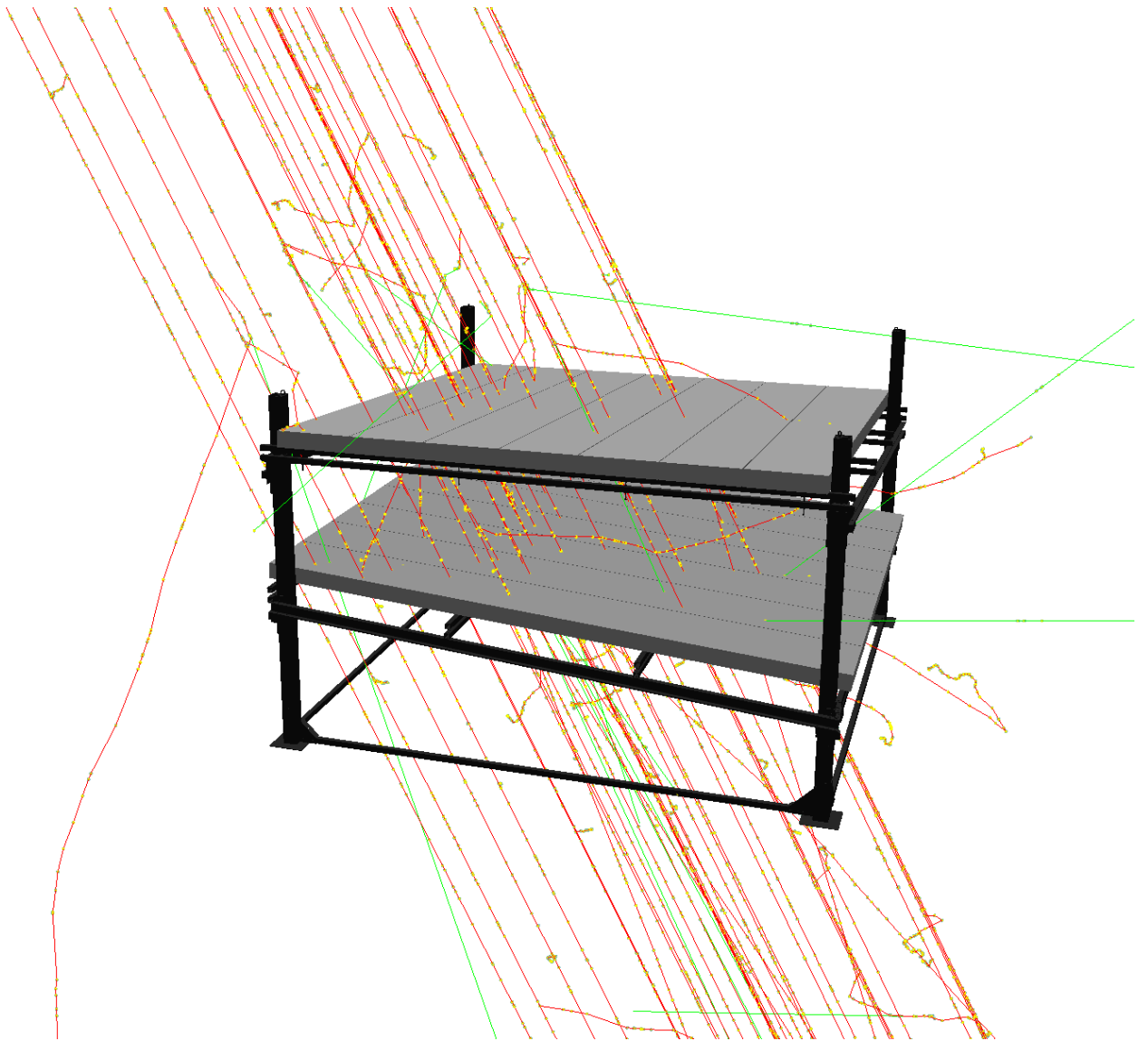


Рисунок 7 — Визуализация прохождения группы частиц через дрейфовые камеры ПротоТРЕК. Изображение получено в графическом интерфейсе Genat4. Отображение стен ВММ и сцинтилляторов отключено для наглядности

параллельных треков и параллельных треков мюонов в каждой их плоскостей и число зарегистрированных в каждой плоскости частиц, записывается в файл "TracksCount selected" который удобно использовать для дальнейшего анализа. Данные о всех событиях, включая отбракованные критериями отбора, записываются в отдельный файл "TracksCount".

2.3 Параметры моделирования

В первом суперцикле планировалось моделирование регистрации ШАЛ от первичных протонов и ядер железа в интервале первичных энергий от 10^{14} до 10^{17} эВ. В программе CORSIKA, однако, задавались два интервала первичных энергий: от 10^{14} до $3 \cdot 10^{15}$ эВ (до «колена») с показателем спектра -2.7 и от $3 \cdot 10^{15}$ до 10^{17} эВ с показателем спектра -3.1. Зенитный угол разыгрывался в интервале от 0 до 90 градусов, азимутальный – от 0 до 360. Заданы магнитное поле и высота над уровнем моря Москвы.

Отдельное внимание следует уделить пороговым значениям энергий частиц. Минимальные энергии, ниже которых прекращается трекинг частиц в CORSIKA, выбираются отдельно для адронной, мюонной, электронной и фотонной компонент ливня. Из опасений чрезмерно долги вычислений, для первого суперцикла пороги были выставлены несколько выше, чем допускает программа: 0.5 ГэВ, 0.1 ГэВ, 50 МэВ и 50 МэВ для адронов, мюонов, электронов и фотонов соответственно. Пороговые энергии задаются также и в Geant4 (еще на стадии алгоритма IGESICA): минимальная энергия частицы до прекращения расчёта ее движения составляет 10 МэВ, а максимальная допустимая энергия частицы – 100 ТэВ. Этот предел обусловлен ограниченными возможностями моделей, используемых в Geant4.

Программа CORSIKA также предоставляет две опции для моделирования электрон-фотонной компоненты. Первая, NKG (Nishimura-Kamata-Greisen) – аналитический расчет множественности и пространственного распределения электрон-фотонной компоненты. Вторая, EGS (Electron Gamma Shower), запускает детальное Монте-Карло моделирования развития электрон-фотонных каскадов в атмосфере. С целью экономии времени, лишь один цикл моделирования был проведен с включенной опцией EGS.

Для расчётов адронных взаимодействий на высоких энергиях использовалась модель QGSJET-II-04, на низких - gheisha.

В каждом цикле набиралась статистика в примерно половину миллиона ливней.

2.4 Результаты моделирования

Рассматриваемый диапазон энергий ($10^{14} - 10^{17}$ эВ) невозможно моделировать непрерывно. Причиной тому является быстрый спад интенсивности потока ПКЛ с ростом энергии. Действительно, при разыгрывании энергии первичной частицы в указанном диапазоне, на каждый ливень энергии 10^{17} эВ будет в среднем приходиться порядка миллиарда ливней с энергией 10^{14} эВ, что делает набор необходимой статистики по ливням в правой части интервала попросту невозможным. Поэтому интервал энергий разбивается на несколько меньших, и в каждом интервале энергий моделируется необходимое число ШАЛ. В эксперименте подобная процедура соответствует набору одинаковой статистики для разных энергий ШАЛ, но за разное время. Для получения полной картины результаты моделирования в разных интервалах энергий необходимо объединить, при этом весовые коэффициенты, с которыми события включаются в итоговые зависимости, должны быть скорректированы в соответствии с эквивалентным временем набора статистики.

Осуществить это возможно при помощи «сшивания» эффективных спектров первичной энергии. Данные спектры нельзя получить в эксперименте, поскольку невозможно точно знать энергию первичной частицы, породившей ШАЛ, группу частиц которого зарегистрировал детектор. Однако в моделировании расчёт таких спектров возможен, и, по своей сути, они описывают вклад событий от ливней разных энергий в общую статистику. Эффективный спектр первичных энергий должен быть непрерывным, поэтому фактор сшивки спектров для граничащих диапазонов энергии как раз соответствует весу событий для интервала меньших энергий.

На Рисунке 8 представлены эффективные спектры энергии ПКЛ, полученные ходе цикла моделирования регистрации ШАЛ от первичных протонов с энергиями $10^{14} - 3 \cdot 10^{15}$ эВ. В данном цикле была включена опция EGS, то есть электрон-фотонная компонента полностью учтена (с поправкой на пороги по энергии). Определённые коэффициенты наклонов спектра составляют -1.26 и -0.97 для всех событий и событий, отобранных согласно критериям отбора соответственно. Пологость эффективных

спектров по сравнению с задаваемым спектром энергий ПКЛ (с коэффициентом -2.7) объясняется увеличением вероятности регистрации ливня с ростом его эффективного сечения, в пределах которого плотность частиц достаточна для регистрации детектором группы. Поэтому интенсивность регистрации групп частиц с ростом первичной энергии падает медленнее, чем интенсивность ПКЛ. Видно, что наложение условий отбора событий меняет наклон спектра, еще больше увеличивая его пологость.

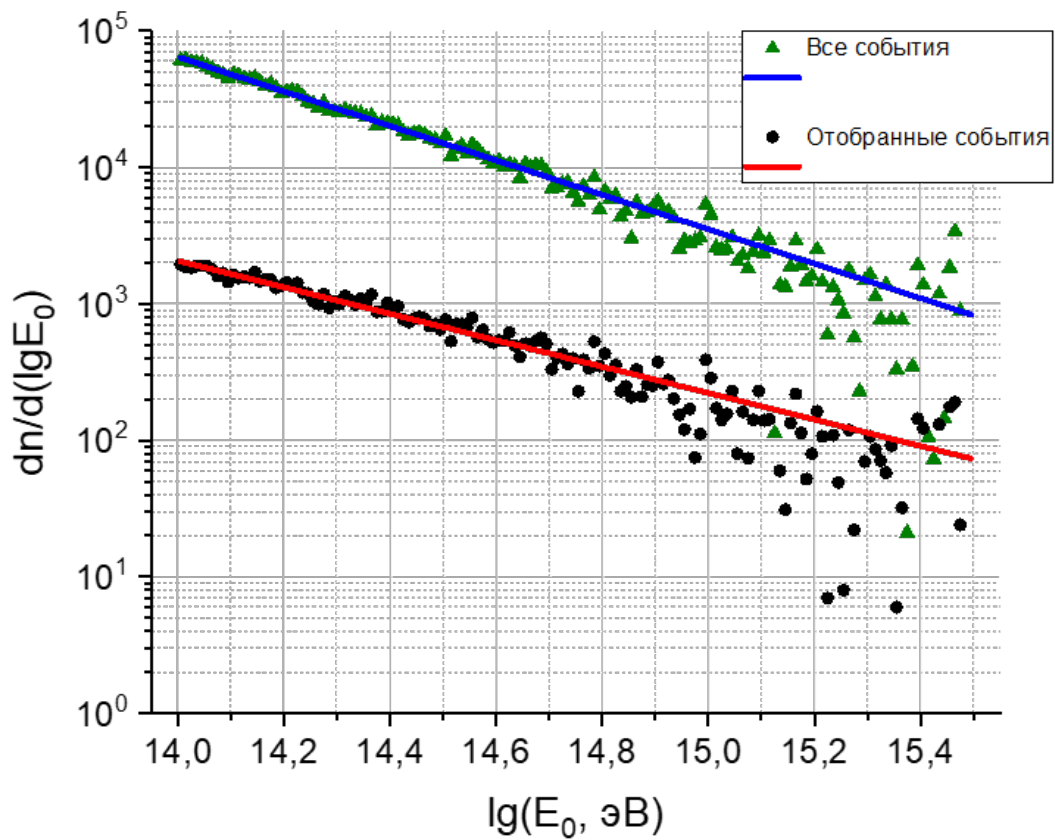


Рисунок 8 — Эффективные спектры энергии ПКЛ, полученные в результате моделирования регистрации ШАЛ от первичных протонов в диапазоне энергий $10^{14} - 3 \cdot 10^{15}$ эВ

Распределения по множественности параллельных треков и параллельных треков мюонов представлены на Рисунке 9. Видно, что для больших множественностей большую часть всех параллельных треков образуют электроны, а доля мюонов мала.

Огромный интерес представляет сравнение распределений числа па-

раллельных треков, полученных в моделировании, с экспериментальными данными. Такое сравнение приведено на Рисунке 10. Оба распределения ввиду разной статистики нормированы на максимум. Видно сильное расхождение между экспериментальными данными и результатами моделирования.

У наблюдаемого расхождения может быть несколько причин:

- 1) В моделировании первого суперцикла не учтена эффективность сцинтилляторов, используемых для триггера события. Она будет заложена в модель ПротоТРЕК для последующих суперциклов.
- 2) Приведённые результаты соответствуют ливням от первичных протонов с энергиями $10^{14} - 3 \cdot 10^{15}$ эВ. Учёт ливней более низких энергий может изменить ввиду перенормировки вид распределения.
- 3) Используемые модели адронных взаимодействий в CORSIKA, а также физические модели в Geant4 могут давать вклад в погрешность моделирования.
- 4) В моделировании первого суперцикла также не учтено пространственное разрешение дрейфовых камер. Возможно, превышение множественности треков связано с отсутствием «неразделимых» треков, которые в эксперименте считаются как один трек. Однако, имеющиеся на данный момент расчёты, выполненные для моделирования детектора ТРЕК указывают на то, что такая коррекция не внесёт сильных изменений.

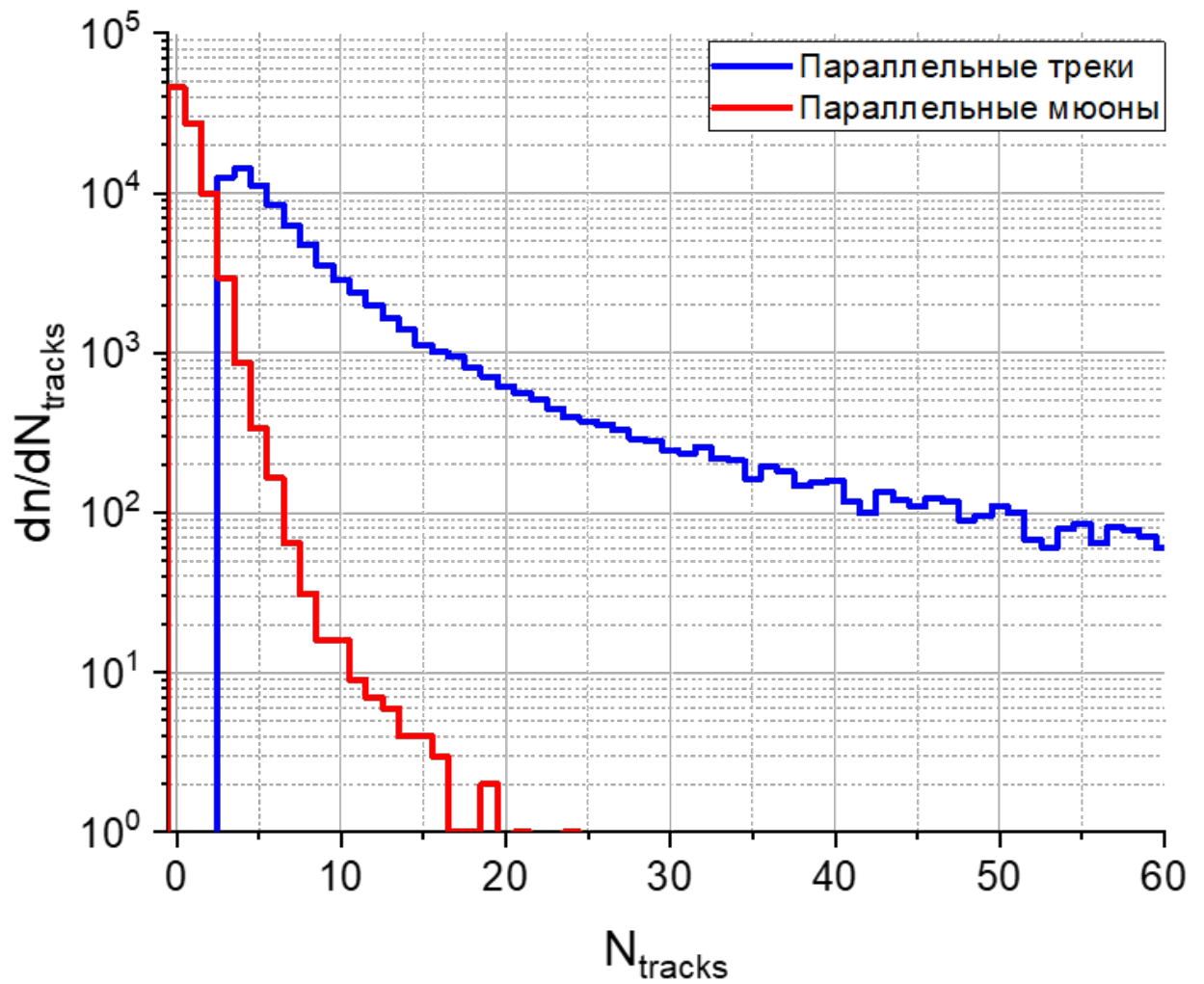


Рисунок 9 — Распределения числа параллельных треков и параллельных треков мюонов, полученные в результате моделирования регистрации ШАЛ от протонов в интервале энергий $10^{14} - 3 \cdot 10^{15}$ эВ, для событий, отобранных согласно критериям

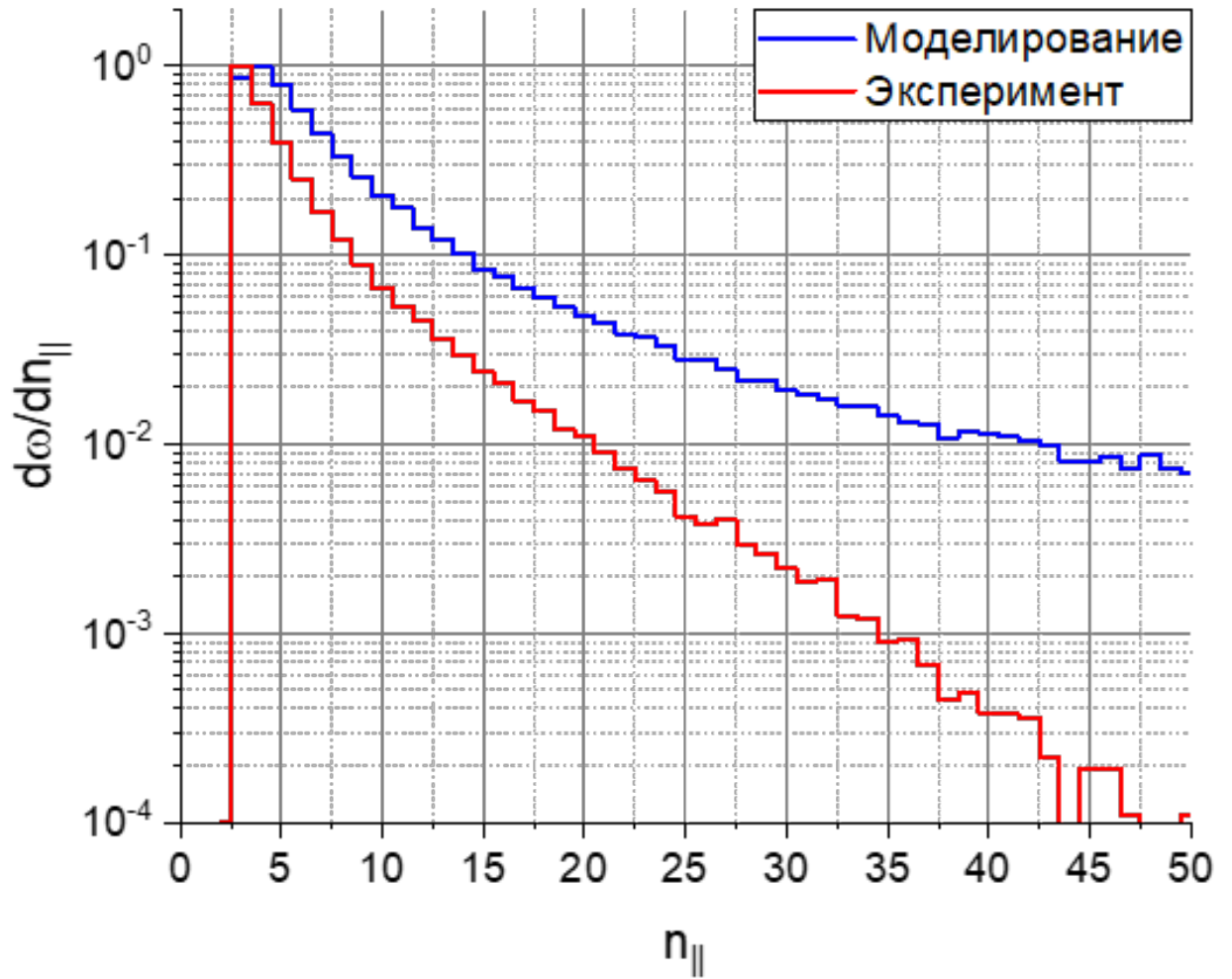


Рисунок 10 — Сравнение распределений числа параллельных треков, полученных в результате моделирования регистрации ШАЛ от протонов в интервале энергий $10^{14} - 3 \cdot 10^{15}$ эВ и в ходе экспериментальной серии детектора ПротоТРЕК

Построены также распределения по углам регистрируемых групп. Форма распределения по зенитному углу для событий, отобранных согласно критериям, Рисунок 11, отличается от аналогично распределения, но без условий отбора, Рисунок 12. Это объясняется ориентацией плоскостей дрейфовых камер в ПротоТРЕК и расположением сцинтилляторов. Распределения по азимутальному углу, показанные на Рисунках 13 и 14, как и следовало ожидать, принципиальных отличий не имеют и соответствуют равномерному распределению.

Для последующих суперциклов моделирования в программу будут добавлены алгоритмы, которые позволят сравнивать реконструированные углы группы с углами прихода первичной частицы. Это позволит провести исследование точности реконструкции направления оси ШАЛ по данным координатно-трекового детектора.

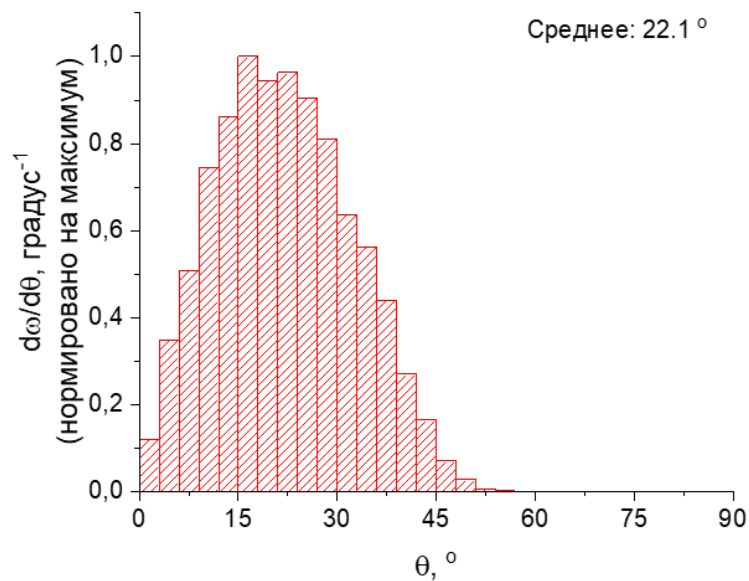


Рисунок 11 — Распределение по зенитному углу, полученное в результате моделирования регистрации ШАЛ от протонов в интервале энергий 10^{14} — $3 \cdot 10^{15}$ эВ, для событий, отобранных согласно критериям

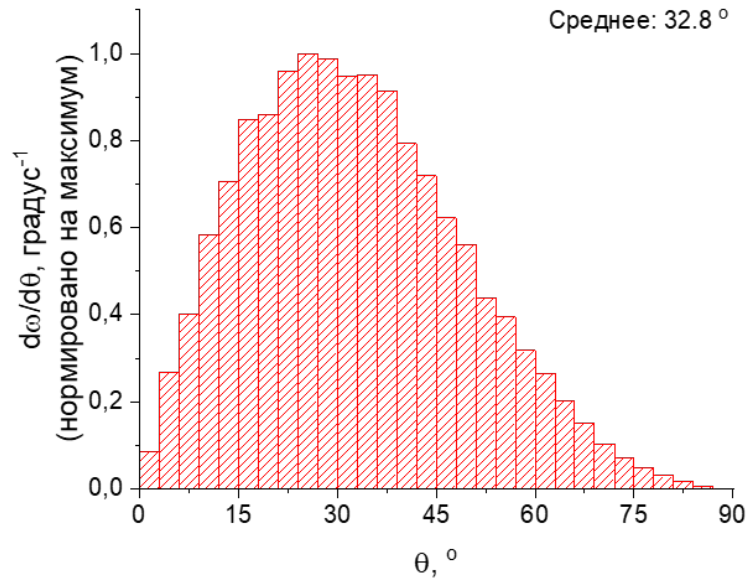


Рисунок 12 — Распределение по зенитному углу, полученное в результате моделирования регистрации ШАЛ от протонов в интервале энергий 10^{14} — $3 \cdot 10^{15}$ эВ, для всех событий, зарегистрированных детектором

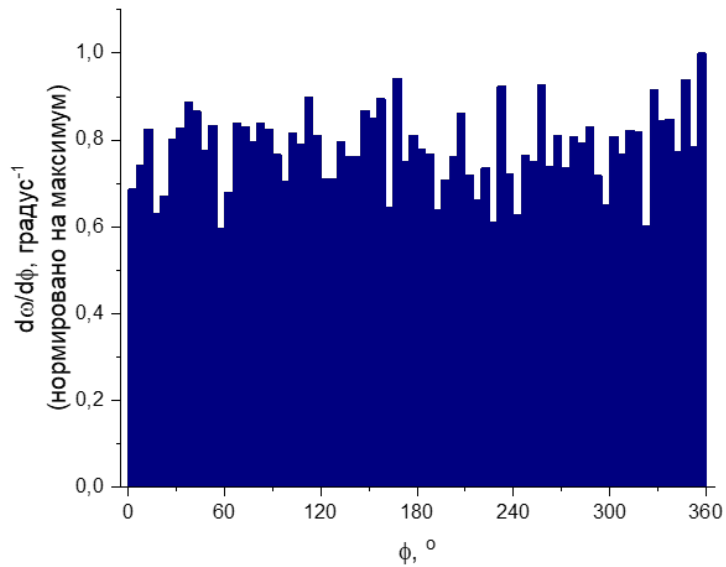


Рисунок 13 — Распределение по азимутальному углу, полученное в результате моделирования регистрации ШАЛ от протонов в интервале энергий 10^{14} — $3 \cdot 10^{15}$ эВ, для событий, отобранных согласно критериям

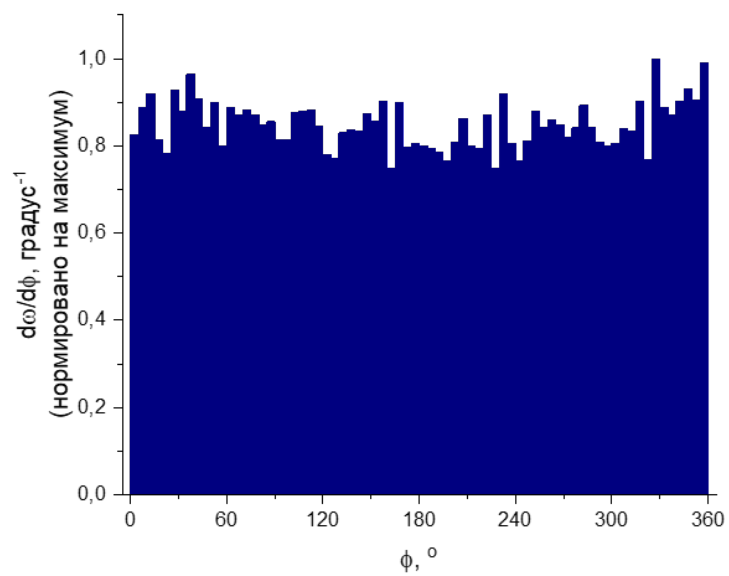


Рисунок 14 — Распределение по азимутальному углу, полученное в результате моделирования регистрации ШАЛ от протонов в интервале энергий $10^{14} - 3 \cdot 10^{15}$ эВ, для всех событий, зарегистрированных детектором

3 Заключение

В ходе первого суперцикла моделирования регистрации ШАЛ детектором на дрейфовых камерах при помощи созданного программного комплекса набрана статистика из порядка миллиона широких атмосферных ливней от первичных протонов и ядер железа в интервале энергий $10^{14} - 10^{17}$ эВ. Проанализированные на данный момент результаты моделирования показывают высокую чувствительность данного метода к конфигурации детектора, условиям триггера и критериям отбора событий.

Полученные эффективные энергетические спектры демонстрируют исключительную необходимость использования алгоритма IGESICA при моделировании работы точечного детектора ШАЛ. Благодаря этому алгоритму возможен учёт влияния размеров эффективного сечения ШАЛ для данных критериев отбора и конфигурации установки. Поскольку программный комплекс будет использоваться для моделирования работы детектора ТРЕК, расчёты, произведённые с его помощью, не должны занижать теоретическую чувствительность метода СЛПМ, и созданный программный комплекс полностью удовлетворяет данному требованию.

Возможности моделирования позволяют также оценивать вклад электронной компоненты в регистрируемую множественность частиц группы. И хотя для околортикальных ШАЛ, наблюдаемых в ПротоТРЕК, электрон-фотонная компонента доминирует над мюонной, учёт электронов и прочих вторичных частиц ШАЛ крайне важен для моделирования детектора ТРЕК.

Второй суперцикл моделирования, находящийся в данный момент на первой стадии, направлен на ликвидацию возможных причин расхождения расчётных и экспериментальных данных. На основании опыта первого суперцикла введены поправки в методику моделирования в CORSIKA, добавляются дополнительные алгоритмы в программу в Geant4, оптимизируется ядро программного комплекса для обеспечения бесперебойных вычислений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] A.A. Petrukhin // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2014. V. 742. P. 228.
- [2] H.P. Dembinski, J.C. Arteaga-Velázquez, L. Cazon et al. // EPJ Web Conf. 2019. V. 210. P. 02004.
- [3] А.А. Петрухин // Успехи физических наук. 2015. Т. 185. № 5. С. 521;
А.А. Petrukhin // Physics-Uspekhi. 2015. V. 58. P. 486.
- [4] В.В. Киндин, М.Б. Амельчаков, Н.С. Барбашина и др. // ПТЭ. 2018. № 5. С. 23; V.V. Kindin, M.B. Amelchakov, N.S. Barbashina et al. // Instr. Experim. Techniques. 2019. V. 61. P. 649.
- [5] E.A. Zadeba, A.A. Borisov, V.S. Vorobyev et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1390. P. 012132.
- [6] E.A. Zadeba, N.V. Ampilogov, N.S. Barbashina et al. // JINST. 2014. V. 9. P. C08018.
- [7] А.А. Петрухин, А.Г. Богданов, Р.П. Кокоулин // ЭЧАЯ. 2018. Т. 49. № 4. С. 1124.
- [8] Л. Барабаш, С. Баранов, Ю. Батусов, и др. // Нейтринный детектор ИФВЭ-ОИЯИ на нейтринных пучках ускорителя У-70 (Протвино) // Приборы и Техника Эксперимента 2003. С. 5
- [9] E.A. Zadeba et al. // The coordinate-tracking detector based on the drift chambers for ultrahigh-energy cosmic ray investigations // J. Instrum. 2014. 9. C08018
- [10] V.S. Vorobyev, A.A. Borisov, N.S. Volkov, et al. // Application of Drift Chambers for Research of Cosmic-Ray Muon Bundles // Phys. At. Nuclei. 2018. V. 81 Issue 9
- [11]

- [12] D. Heck et al. // Report FZKA 6019 1998.
(<https://www.iap.kit.edu/corsika/>)
- [13] S. Agostinelli et al. // Geant4 - a simulation toolkit, Nucl. Instr. Methods Phys. Res. 2003. V. 506. P. 250
- [14] J. Allison et al. // Geant4 Developments and Applications, IEEE Transactions on Nuclear Science 2006. V. 53. P. 270
- [15] S. Guindon, R. Veenhof, A. Bellerive // Study of Drift Electrons Inside an ATLAS Muon Tube, Tech. rep. 2008. (<https://garfieldpp.web.cern.ch/>)
- [16] <https://github.com/christopherpoole/CADMesh>