

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

**Создание алгоритма загрузки данных CORSIKA в программу
моделирования детектора ТРЕК в Geant4**

Научный руководитель

доц., к.ф.-м.н.

_____ Е. А. Задеба

Студент

_____ Р. В. Николаенко

Москва 2020

Содержание

1	Введение	2
1.1	Метод СЛПМ	2
1.2	Детектор ТРЕК	5
1.3	Цель работы	7
2	Алгоритм загрузки данных CORSIKA в Geant4	8
2.1	Проблема стандартного формата файлов вывода CORSIKA	8
2.2	IGESICA	9
2.3	Результаты пробного моделирования по данным CORSIKA .	11
3	Заключение	16

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 [3,4], 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 .

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 исследования 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.

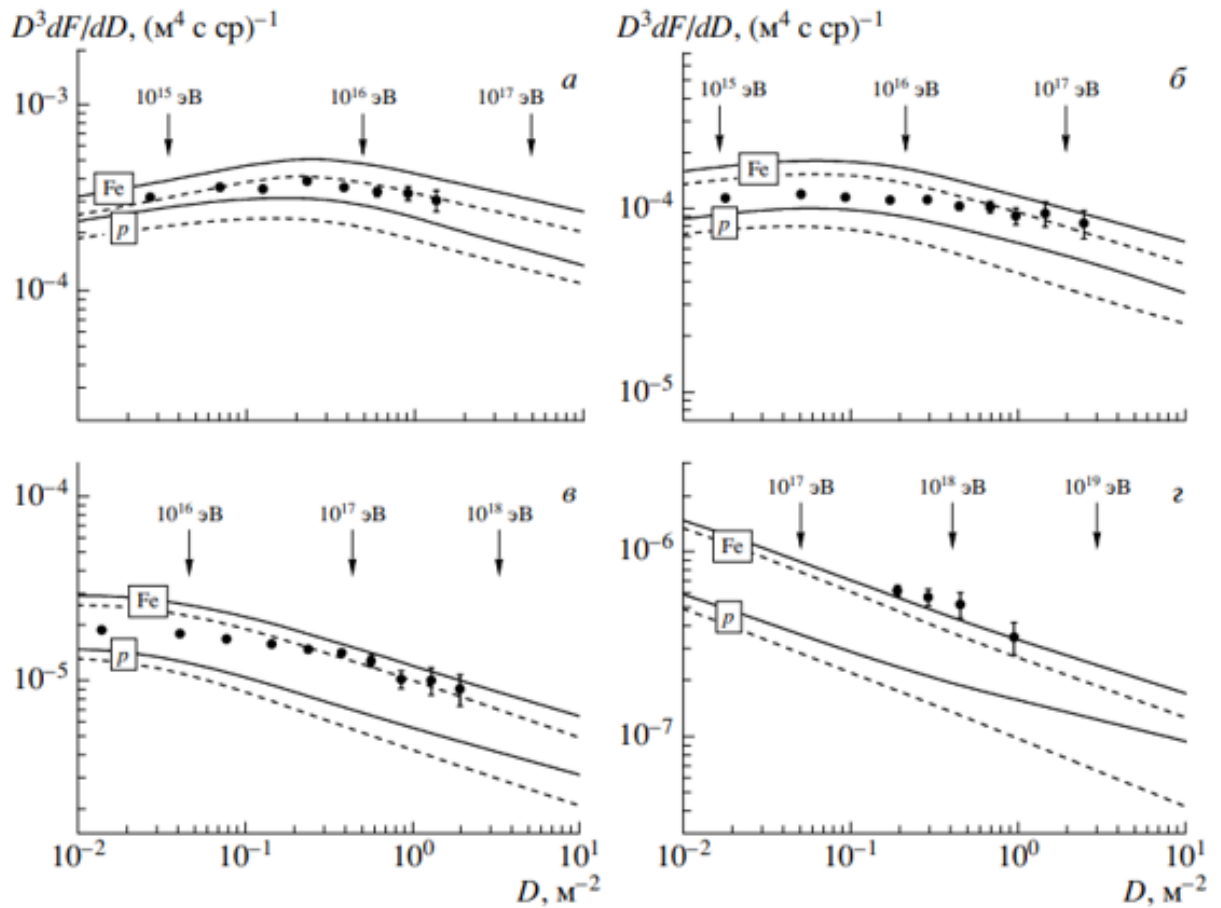


Рисунок 1 — Экспериментальные и расчетные дифференциальные спектры локальной плотности мюонов для зенитных углов 35° (а), 50° (б), 65° (в) и 78° (г). Точки — экспериментальные данные; сплошные и штриховые кривые — расчет с моделями QGSJET01 и SIBYLL 2.1 соответственно. Нижние пары кривых на каждом рисунке — 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. На данный момент завершено возведение опорных и рамных металлоконструкций, установлена облицовка пристройки, и проложены основные коммуникации. Всего в детектор ТРЕК будут установлены 264 дрейфовые камеры, по 132 в две плоскости детектора. В одной плоскости камеры размещены вертикально, в другой – горизонтально; такая конфигурация позволяет реконструировать пространственные углы регистрируемой группы мюонов. На Рисунке 2 представлена схема расположения детектора ТРЕК относительно других установок комплекса НЕВОД.

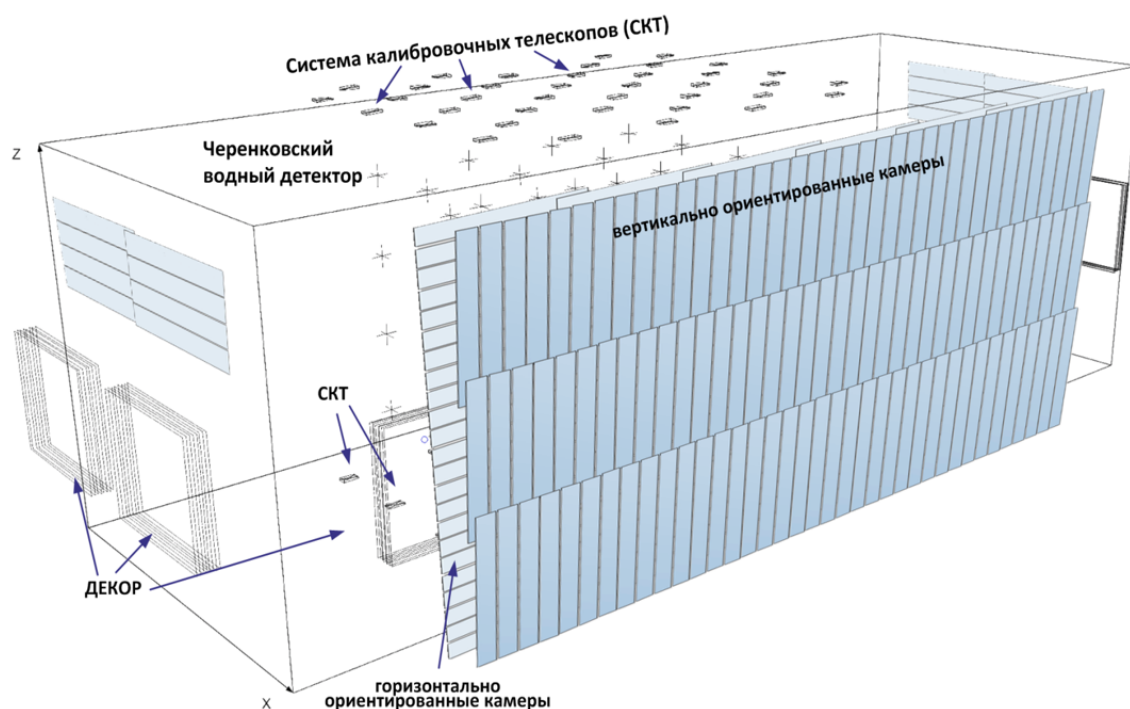


Рисунок 2 — Схематическое расположение детектора ТРЕК относительно других детекторов комплекса - ДЕКОР, СКТ, ЧВД и установки КТУДК (на торцах ЧВД, над супермодулями ДЕКОР)

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

Таблица 1 — Характеристики дрейфовых камер ИФВЭ

Размеры	4000 × 508 × 112 мм ³
Активная поверхность	3.7 × 0.5 м ²
Скорость дрейфа	~ 41.6 мкм/нс
Координатная точность	~ 1 мм
Угловая точность	~ 1.7°
Состав используемой газовой смеси	94%Ar + 6%CO ₂

Для интерпретации экспериментальных данных новой установки, учета ее конструкционных особенностей, влияния на её отклик вторичных частиц, образованных от взаимодействий частиц ливня с веществом, окружающем детектор, а также отработки методов реконструкции событий создаётся 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 [9], Geant4 [10,11] и Garfield++ [12]. На Рисунке 3 приведена блок-схема программного комплекса, включающая не только основные используемые программы и пакеты, но и сшивки между ними, необходимые для корректной передачи данных моделирования из одной программы в другую.



Рисунок 3 — Блок-схема программного комплекса для моделирования отклика детектора ТРЕК при регистрации ШАЛ

1.3 Цель работы

Поскольку в течение последних двух лет была завершена основная работа над созданием модели детектора ТРЕК в среде Geant4, отладкой алгоритмов моделирования отклика ДК и сбора необходимой информации в процессе моделирования событий, упор в работе сместился в сторону разработки интерфейса между программой CORSIKA и программой моделирования детектора ТРЕК в Geant4. Была поставлена цель создать алгоритм, позволяющий автоматически готовить необходимую информацию для импортирования данных запуска моделирования регистрации групп мюонов детектором ТРЕК в Geant4 после завершения расчёта ШАЛ в CORSIKA. Алгоритм должен быть универсальным, подходить для любого числа смоделированных ливней, их энергий, объёма файлов и числа потоков, на которых исполняется программа.

2 Алгоритм загрузки данных CORSIKA в Geant4

2.1 Проблема стандартного формата файлов вывода CORSIKA

Первая стадия комплексного моделирования реализуется на базе программы CORSIKA (v7.7400), с помощью которой моделируются широкие атмосферные ливни и формируются сведения о частицах, достигших уровня детектора. В файлы вывода CORSIKA записывает необходимую для следующей программы моделирования (Geant4) информацию о частицах, долетевших до установленной пользователем высоты над уровнем моря, то есть детектирующая поверхность в данной программе представляет собой горизонтальную плоскость. Такой формат записи неудобен при моделировании работы детектора ТРЕК, поскольку его плоскости ориентированы вертикально, и из всего массива частиц на плоскости невозможно выделить только те, которые попадут в установку, расположенную произвольным образом. То есть, при попытке запустить частицы в детектор ТРЕК с некой плоскости над ним, мы бы были вынуждены запускать все частицы ливня, чтобы убедиться, что учтём все частицы, которые в итоге попадут по детектору, Рисунок 4, что привело бы к потере машинного времени на моделирование частиц, не попавших в детектор.

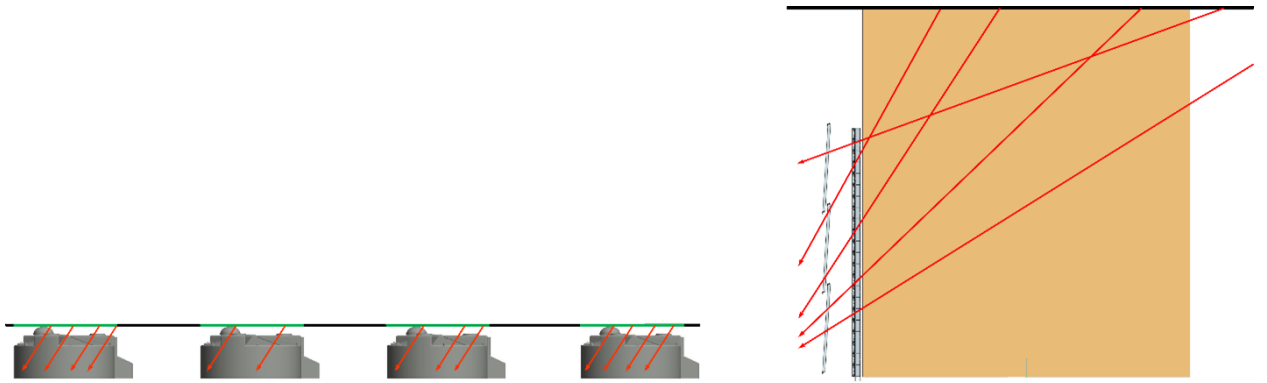


Рисунок 4 — Отличие между горизонтальным (слева) и вертикальным детектором ТРЕК (справа) с точки зрения использования формата вывода данных CORSIKA. В первом случае на плоскости удаётся выделить области, с которых запускать частицы, а во втором — нет

2.2 IGESICA

Для решения этой проблемы создан алгоритм смены формата записи данных о частицах ШАЛ, получивший название IGESICA (**I**nput for **GE**ant4 **S**imulation from **C**orsika data generation **A**lgorithm). В его основе лежит программа, реализованная в Geant4, именуемая программой «предварительного моделирования». В Geant4 задаётся слой воздуха, размерами $120 \times 120 \times 0.02$ км³. Причём слой является не цельным объёмом, а составлен из большого числа поставленных вплотную друг к другу параллелепипедов воздуха $32 \times 24 \times 20$ м³ (что соответствует размерам здания НЕВОД и пристройки ТРЕК), Рисунок 5. Верхняя граница слоя — это та самая плоскость записи частиц в CORSIKA, с неё и запускаются частицы ливня. Проходя через слой воздуха, частицы пересекают границы параллелепипедов, при этом, когда они влетели в объём какого-либо параллелепипеда, записывается информация о типе, энергии и векторе импульса частицы в момент пересечения границы.

Запустить все частицы ливня разом в Geant4 возможно в случае ливней от первичных частиц с энергией не более $\sim 10^{16} - 10^{17}$ эВ (в зависимости от величины зенитного угла и массы первичной частицы), хотя перегружать моделирование опасно и при меньших энергиях. Поэтому программа

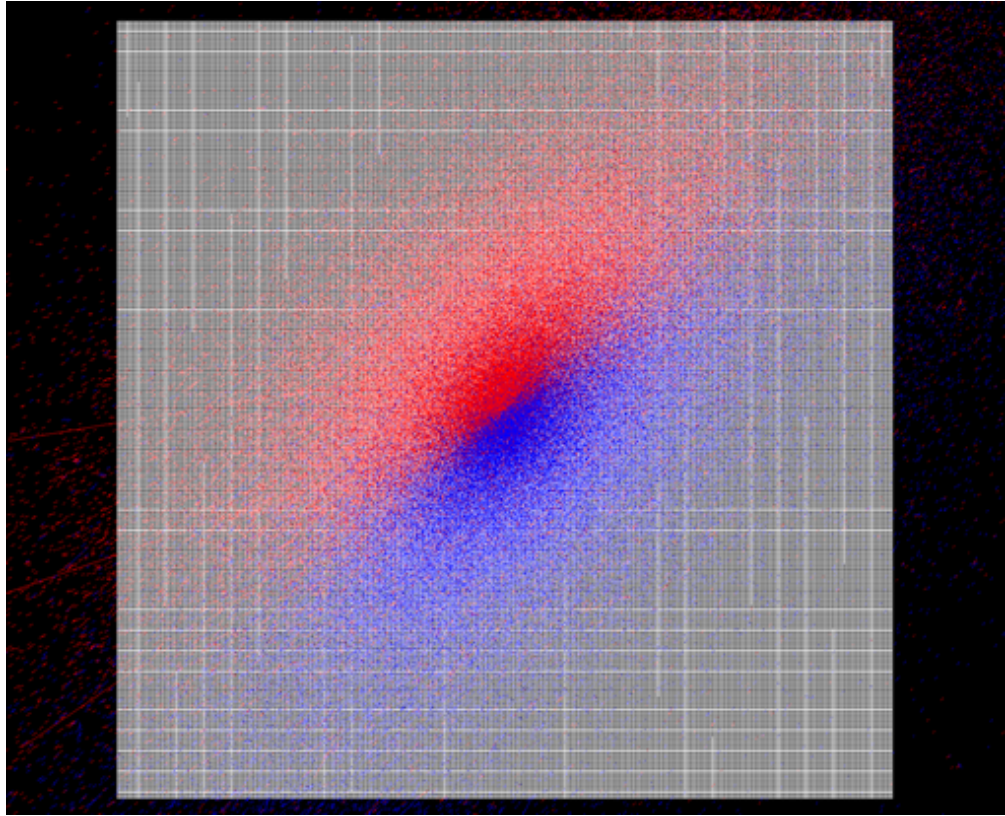


Рисунок 5 — Вид сверху на ШАЛ от протона энергии 10^{18} эВ, пришедший под зенитным углом 70° , запущенный на матрицу размером 15×15 км² (в вакууме, чтобы программа могла отрисовать). Красным отображаются треки отрицательно заряженных частиц, синим — положительно

предварительного моделирования обрабатывает прохождение ливня через слой воздуха по частям. Кроме того, для уменьшения времени вычислений данная программа поддерживает многопоточность. Таким образом, каждый поток программы считывает из исходного файла только около 100 МБ данных о частицах, и запускает их в отдельном, моделируемом им событии). Если объём оставшейся части файла меньше 100 МБ, она распределяется поровну между всеми потоками. Свободный на данный момент поток берёт объём данных равный

$$v = \frac{X}{Th}, \quad (2.1)$$

где X — объём оставшейся части файла, а Th — число потоков.

Каждый поток использует отдельный уникальный файл для записи результатов моделирования своей части ШАЛ. Записывать в один файл по-

токи не могут, а работать с неполными файлами большого объёма трудно. Поэтому в процессе моделирования одного ливня программой создаётся

$$N = Th \times \left(\left\lfloor \frac{V}{Th \times V_0} \right\rfloor + 1 \right), \quad (2.2)$$

где Th – число потоков, на которых исполняется программа, V - объём файла обрабатываемого ливня, $V_0 = 100$ МБ.

Следующая программа затем объединяет файлы, созданные программой предварительного моделирования, одновременно сортируя данные о частицах так, что все частицы отдельного события оказываются сгруппированными вместе. В результате работы алгоритма IGESICA создаются файлы, содержащие в себе серии событий для запуска в детектор ТРЕК в Geant4. Алгоритм позволяет генерировать большое количество событий на основе единственного ливня (порядка 10^6 для ливней от первичных протонов энергии 10^{18} эВ под большими зенитными углами).

2.3 Результаты пробного моделирования по данным CORSIKA

Для первых тестов алгоритма загрузки использовались данные моделирования ШАЛ от первичных протонов энергии 10^{18} эВ под зенитными углами $60^\circ - 80^\circ$, так как они создают достаточно большую нагрузку на программы, при этом характерное время моделирования позволяет проводить отладку программ в приемлемые сроки, Рисунок 6. За два месяца проведения пробного моделирования было обработано больше 20 ливней, давших серии с общим числом событий $\sim 2 \cdot 10^7$.

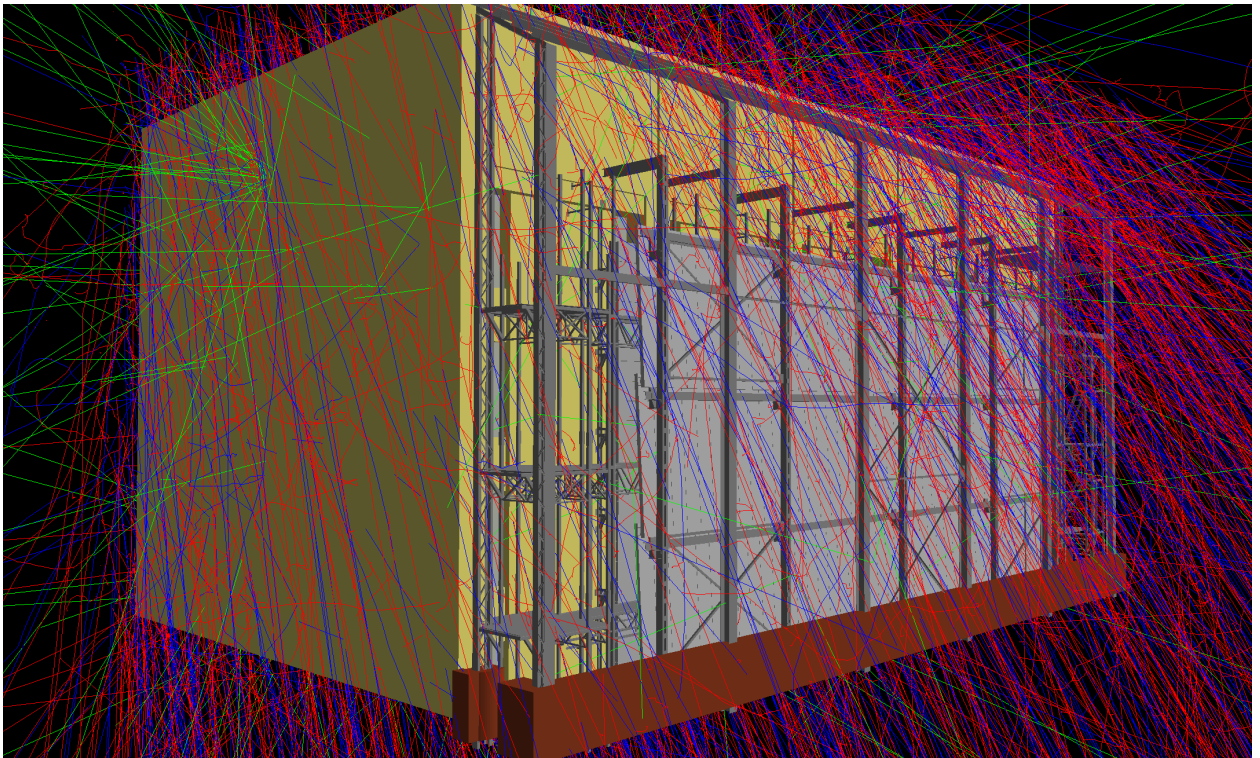


Рисунок 6 — Результат моделирования события с высокой плотностью частиц по данным CORSIKA

Важнейшей задачей моделирования является оценка доли вторичных частиц, зарегистрированных в событии относительно мюонов. Это позволит корректировать восстанавливаемую множественность частиц, и, соответственно, их плотность. Распределение доли вторичных частиц в событии, построенное по данным всех промоделированных событий мало информативно, поскольку большая их часть имеет множественность 1-3, такая дискретность искажает вид распределения. Поэтому отбирались события с небольшим разбросом множественности зарегистрированных частиц и для них вычислялось среднее значение доли вторичных частиц. Полученная зависимость, Рисунок 7, имеет вид равномерного распределения на уровне около 34%; это свидетельствует об относительно однородном влиянии металлоконструкций на образование вторичных частиц, поскольку в противном случае на высоких плотностях наблюдалось бы некоторое искажение значения их доли.

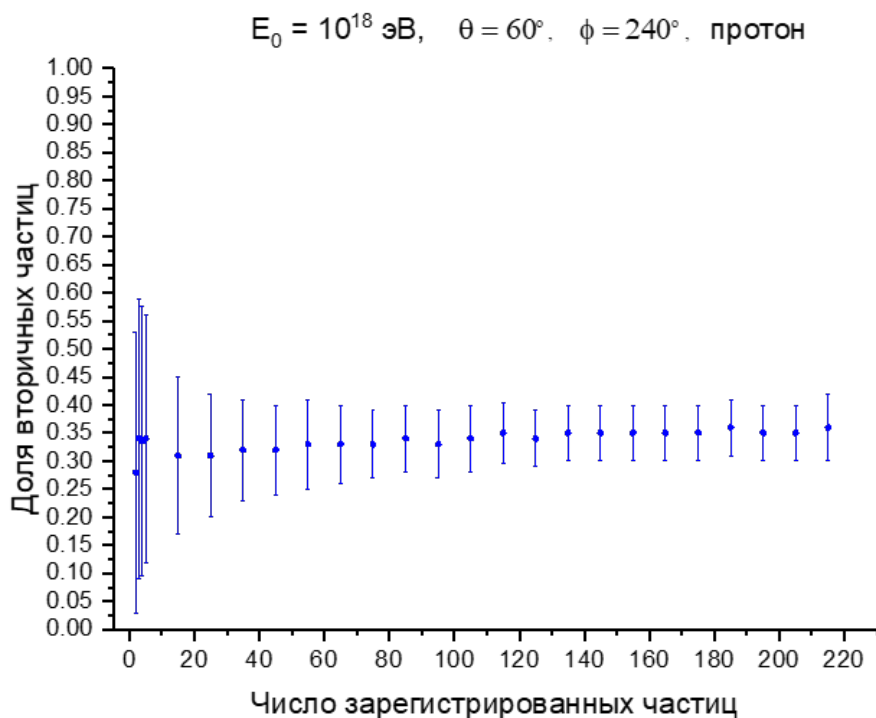


Рисунок 7 — Зависимость средней доли вторичных частиц от числа зарегистрированных частиц в событии

Кроме доли вторичных частиц, необходимо определить, какая часть вторичных частиц пройдет через дрейфовые камеры так, что алгоритмы реконструкции события определят их как мюоны в данной группе. Критерием такого отбора является угол разлёта между реконструируемым треком частицы и направлением, вдоль которого прошла вся группа. Если он составляет менее 5° , частица определяется как мюон данной группы. Поскольку при моделировании мы знаем, какой трек принадлежит какой частице, можно рассчитать долю вторичных частиц, ошибочно определяемых как мюоны. Для этого было построено интегральное распределение событий по углу разлёта, Рисунок 8, из которого видно, что доля вторичных частиц, определяемых как мюоны, составляет около 23%.

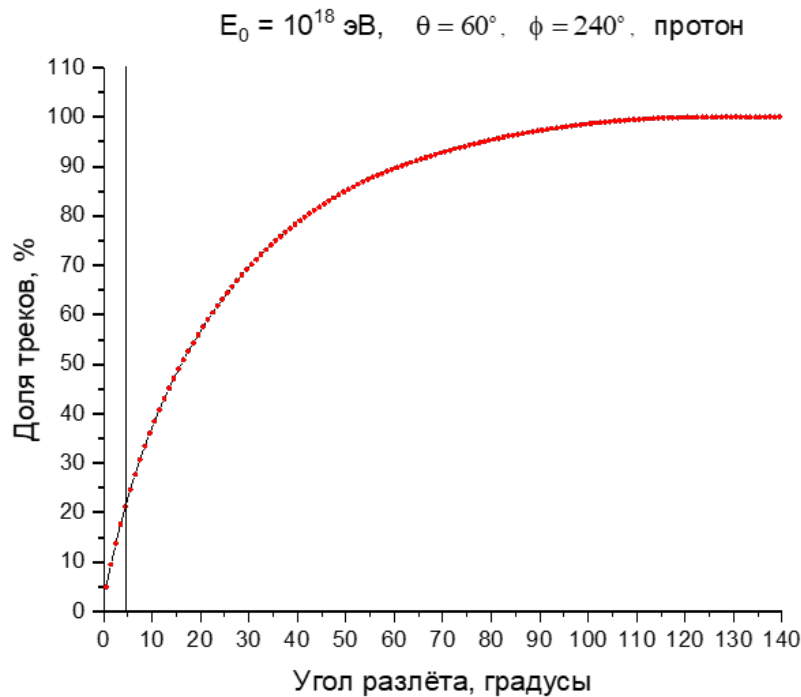
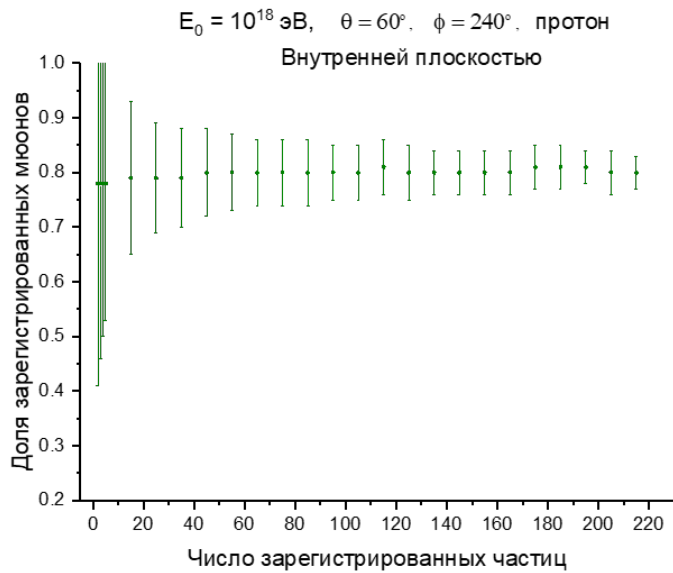


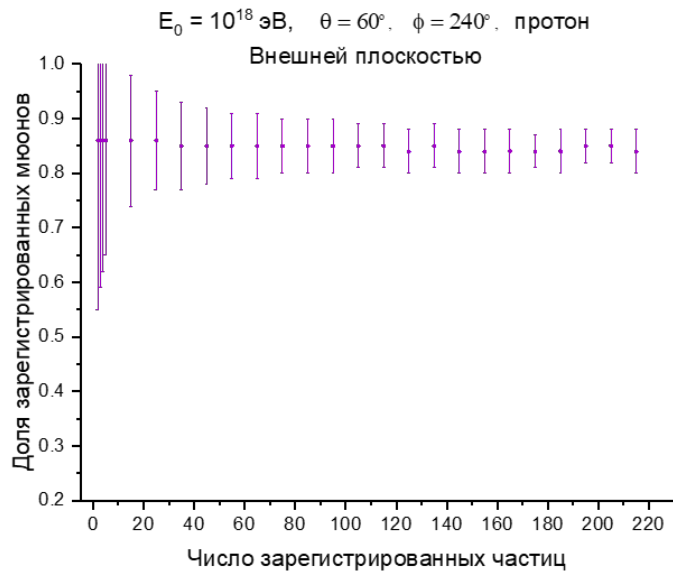
Рисунок 8 — Интегральное распределение событий по углу разлёта

Комбинируя полученные результаты, можно сделать вывод, что в среднем около 7.8% частиц, определённых как мюоны при реконструкции, являются на самом деле вторичными. Соответственно такая же ошибка возникает при определении плотности частиц в группе.

Моделирование также позволяет определять долю зарегистрированных мюонов среди тех, которые попали в рабочий объём детектора. То есть рассматривается отношение числа мюонов, давших сигнал на всех 4 проволоках ДК, к числу мюонов, которые прошли через детектор. Результаты представлены отдельно для внешней и внутренней плоскостей камер, также были вычислены средние значения доли зарегистрированных мюонов для разных множественностей. Зависимости опять же носят постоянный характер (Рисунок 9а и Рисунок 9б), для внутренней плоскости, где камеры расположены горизонтально, это около 80%, а для внешней, где камеры установлены вертикально – около 86%.



(а)



(б)

Рисунок 9 — Зависимость доли зарегистрированных мюонов от числа зарегистрированных частиц для внутренней плоскости (а) и внешней (б)

То, что чувствительность у внешней плоскости оказалось выше, ожидаемый результат, поскольку ввиду расположения в ней камер (вертикальное, плоскость дрейфа электронов квазипараллельна земле), большая доля частиц проходит через камеры так, что формируется сигнал на всех сигнальных проволоках (трек частицы проходит вдоль линии расположения проволок в середине камеры). Полученные результаты также следует использовать для корректировки определяемой плотности мюонов в группе.

3 Заключение

Проведено моделирование регистрации ШАЛ в детекторе ТРЕК с энергиями 10^{18} эВ. Оно показало высокую эффективность алгоритма IGESICA в преобразовании данных CORSIKA из стандартного формата в подходящий для моделирования в Geant4. Возможность накопить хорошую статистику по событиям на основе нескольких десятков ливней позволяет сильно сэкономить время, затраченное на общий процесс моделирования, поскольку именно моделирование ШАЛ является самым затратным этапом. Программа моделирования детектора ТРЕК корректно распределяет используемые данные между потоками компьютера, на которой она выполняется, что было протестировано на ПК с 32 потоками.

Тестирование также показало недочёты в созданном алгоритме. Во-первых, моделирование прохождения частиц через столь большой объём в программе предварительного моделирования требует значительных объёмов оперативной памяти, что уменьшает универсальность и гибкость алгоритма. Требуемая оптимизация заключается в динамическом задании размеров слоя, через который будут запускаться частицы, на основании пространственного распределения частиц для конкретного ливня.

Во-вторых, наблюдается наличие «сверхплотных» событий, регистрируемых вблизи оси ливня, моделирование которых напрямую опять же приводит к огромным затратам оперативной памяти, в следствие чего необходимо разработать алгоритм для разбиения этих событий на части, для дальнейшего их поэтапного моделирования.

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] D. Heck et al. // Report FZKA 6019 1998.
(<https://www.iap.kit.edu/corsika/>)
- [10] S. Agostinelli et al. // Geant4 - a simulation toolkit, Nucl. Instr. Methods Phys. Res. 2003. V. 506. P. 250
- [11] J. Allison et al. // Geant4 Developments and Applications, IEEE Transactions on Nuclear Science 2006. V. 53. P. 270

- [12] S. Guindon, R. Veenhof, A. Bellerive // Study of Drift Electrons Inside an ATLAS Muon Tube, Tech. rep. 2008. (<https://garfieldpp.web.cern.ch/>)