

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

УДК 524.1

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
**ИНТЕНСИВНОСТЬ ПОТОКА МЮОНОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ
ПОД БОЛЬШИМИ ЗЕНИТНЫМИ УГЛАМИ**

Научный руководитель

к.ф.-м.н.

_____ А. Н. Дмитриева

Студент

_____ Н. В. Пономарева

Москва 2021

СОДЕРЖАНИЕ

1	Введение	2
1.1	Экспериментальная установка	3
1.2	Подготовка статистических данных для анализа	5
2	Оценка влияния метеозффектов на скорость счета отдельных пар СМ	6
3	Анализ треков частиц	10
3.1	Уменьшение краевых эфффектов	11
3.2	Расчёт пороговой энергии	11
4	Распределение треков мюонов по углам и энергиям	15
	Заключение	17
	Список использованных источников	18

1 ВВЕДЕНИЕ

Мюон (μ) – это короткоживущая заряженная элементарная частица, со спином $\frac{1}{2}$, временем жизни 2.2 мкс, и массой приблизительно в 207 превосходящей массу электрона (105.7 МэВ). Существуют как положительно, так и отрицательно заряженные мюоны.

В силу короткого времени жизни мюоны не могут существовать в первичных галактических космических лучах (ГКЛ). Источник мюонов – распады π -мезонов и K -мезонов, которые интенсивно рождаются при столкновениях частиц первичного космического излучения с ядрами атомов атмосферы. Мюоны не являются ядерно-активными частицами, относительно слабо взаимодействуют с веществом и теряют свою энергию главным образом на возбуждение и ионизацию атомов воздуха.

Интерес к изучению потока мюонов обусловлен тем, что эти частицы способны донести до уровня наблюдения информацию как о первичном космическом излучении, так и о процессах в атмосфере, влияющих на генерацию мюонов и определяющих их прохождение через атмосферу. Во многих экспериментах мюоны являются фоновыми частицами и для оценки числа фоновых событий также необходимо знать поток мюонов [1].

1.1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

ДЕКОР [2] – координатный детектор большой площади – входит в состав экспериментального комплекса (ЭК) НЕВОД [3] (рисунок 1.1) и представляет восемь супермодулей, расположенных в галереях вокруг черенковского водного калориметра НЕВОД (бассейн объемом 2000 м^3 , в котором размещена пространственная решетка квазисферических модулей (КСМ), регистрирующих черенковское излучение). ДЕКОР расположен на высоте 173 м над уровнем моря.

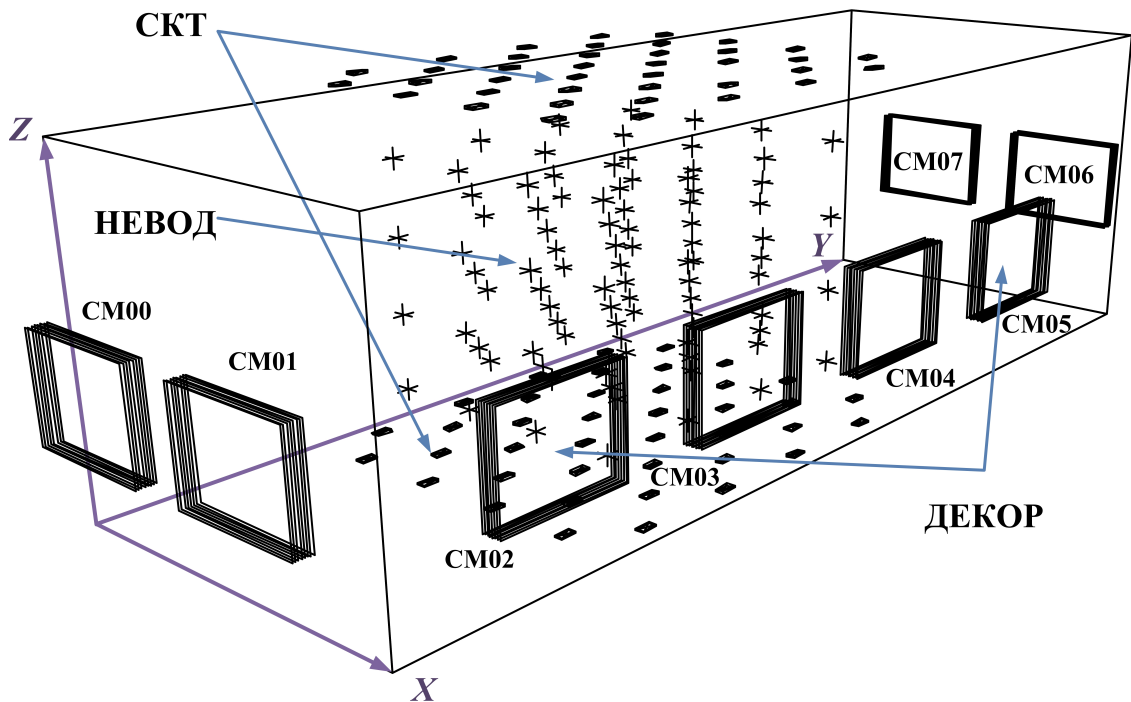


Рисунок 1.1 – Экспериментальный комплекс НЕВОД-ДЕКОР

Каждый супермодуль (СМ) (рисунок 1.2) – это восемь параллельных плоскостей с чувствительной областью размером $3.1 \times 2.7 \text{ м}^2$, подвешенных вертикально на расстоянии 6 см друг от друга. Каждая плоскость состоит из 16 камер. Каждая камера включает 16 газоразрядных трубок с внутренним сечением $0.895 \times 0.895 \text{ см}^2$, заполненных смесью Ar, CO_2 , n-пентан и работающих в режиме ограниченного стримера. Внутри каждой трубки натянута анодная нить, которую удерживают от провисания пластмассовые холдеры – пластины шириной 5 мм, расположенные на расстоянии 48.5 см друг от друга и симметрично относительно центра камеры.

Съем информации производится со стрипов – алюминиевых пластинок, прикрепленных к каждой плоскости: с шагом 1 см вдоль камер – X-проекция и 1.2 см поперек камер – Y-проекция.

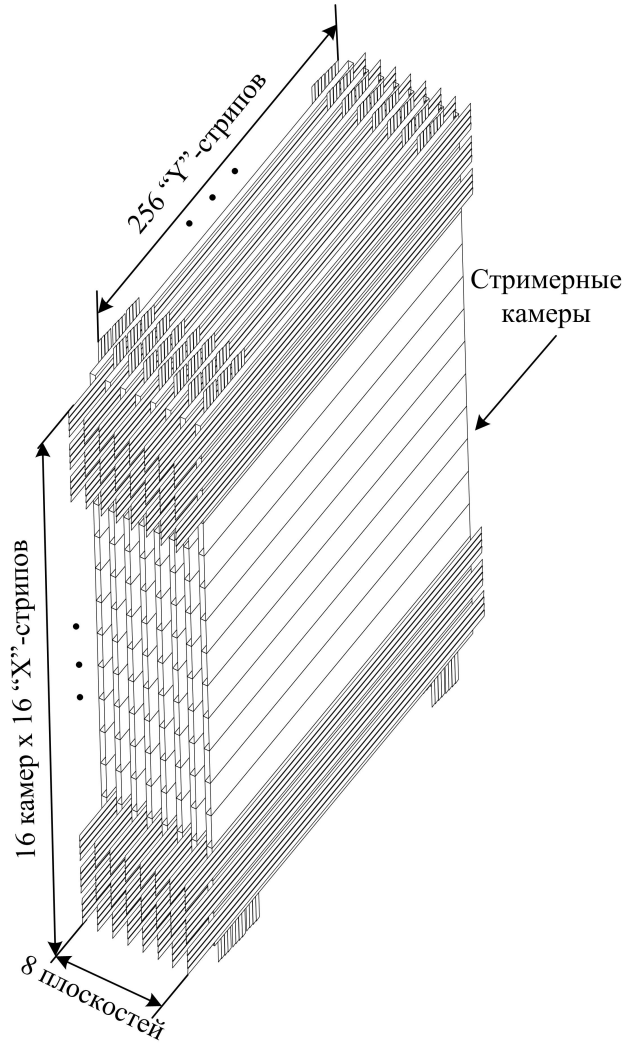


Рисунок 1.2 — Супермодуль установки ДЕКОР

ДЕКОР позволяет измерить поток мюонов при больших зенитных углах θ и рассчитать абсолютную интенсивность мюонов $I(\theta, \varphi, E_{\min})$ для зенитного θ и азимутального φ углов прихода частиц, и пороговой энергии E_{\min} по формуле [4]:

$$I(\theta, \varphi, E_{\min}) = \frac{N(\theta, \varphi, E_{\min})}{T \cdot \varepsilon_{\text{CM1}} \cdot \varepsilon_{\text{CM2}} \cdot S\Omega(\theta, \varphi, E_{\min})}, \quad (1.1)$$

где $N(\theta, \varphi, E_{\min})$ – число событий, зарегистрированных в данных угловых и энергетическом интервалах, T – “живое” время измерений. Коэффициенты $\varepsilon_{\text{CM1,2}}$ учитывают эффективность срабатывания отдельных супермодулей пары. $S\Omega(\theta, \varphi, E_{\min})$ – светосила установки с учетом эффективности регистрации и реконструкции треков. В силу приближенной симметрии потока по азимутальному углу при фиксированных энергиях E_{\min} и углах θ для получения зависимости интенсивности от зенитного угла $I(\theta, E_{\min})$ используются усредненные по азимутальному углу значения.

1.2 ПОДГОТОВКА СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА

В предыдущем семестре были проанализированы экспериментальные данные совместного триггера координатного детектора ДЕКОР и черенковского водного детектора НЕВОД с июня 2013 г. по октябрь 2020 г. В сумме обработано около 50 тыс. часов.

Данные эксперимента представляют собой серии, состоящие из наборов, каждый из которых длится от нескольких часов до нескольких суток. Одиннадцатая серия включает 221 набор, двенадцатая — 881, тринадцатая для указанного периода — 327 наборов. Для каждого набора рассчитаны:

- “временной центр” набора;
- среднее атмосферное давление в месте расположения установки;
- среднемассовая температура атмосферы, найденная методом линейной интерполяции по данным [5];
- живое время работы установки;
- количество событий в наборе;
- скорость счета событий.

Полученные метеорологические данные использовались для оценки воздействия температурного и барометрического эффектов [1] на интенсивность потока мюонов и определения необходимости введения поправок на эти эффекты.

Влияние барометрического эффекта на интенсивность потока мюонов на поверхности Земли заключается в том, что вместе с увеличением атмосферного давления возрастает пороговая энергия мюона, необходимая для прохождения через атмосферу, так как увеличивается количество вещества на пути мюона.

Влияние температурного эффекта для рассматриваемого диапазона от 1 до 10 ГэВ заключается в основном в геометрическом факторе — в увеличении геометрического пути мюона за счёт поднятия уровня генерации пионов и каонов от первичных ГКЛ, при этом увеличивается вероятность распада мюона. Для оценки влияния метеоэффектов далее были построены графики зависимости скорости счета всех СМ от среднемассовой температуры и среднего атмосферного давления.

Все программы обработки данных написаны на языке C++ [6].

2 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕТЕОЭФФЕКТОВ НА СКОРОСТЬ СЧЕТА ОТДЕЛЬНЫХ ПАР СМ

Статистические данные работы установки, а также данные среднего атмосферного давления и среднемассовой температуры, описанные в предыдущем пункте, были рассортированы по парам СМ и записаны в отдельные файлы. Вид файла для пары СМ 12 представлен на рисунке 2.1.

Th[°]	Tstart[Y]	Tstop[Y]	Nser[Y]	Nnab[Y]	LifeTime[Y]	Nevent[Y]	NeventPerLifeTime[Y]	AvPress[Y]	AvTemperature[Y]
					Life Time				
05.06.2013 13:54:00	04.06.2013 13:12:00	06.06.2013 14:36:00	11	0	45,69	2,30014E6	50342,26308	997,17971	253,81753
07.06.2013 14:39:00	06.06.2013 14:36:00	08.06.2013 14:42:00	11	1	44,46	2,26245E6	50887,26946	996,7805	252,60634
11.06.2013 04:04:30	10.06.2013 05:13:00	12.06.2013 02:56:00	11	2	42,15	2,20976E6	52426,00237	988,73123	255,1865
13.06.2013 01:41:30	12.06.2013 02:56:00	14.06.2013 00:27:00	11	3	41,96	2,18336E6	52034,34223	997,60996	253,78804
14.06.2013 18:31:00	14.06.2013 00:27:00	15.06.2013 12:35:00	11	4	33,34	1,72627E6	51777,86443	999,25522	255,8827
17.06.2013 17:56:00	17.06.2013 05:01:00	18.06.2013 06:51:00	11	5	23,8	1,26103E6	52984,2437	992,165	254,70169
18.06.2013 21:37:00	18.06.2013 08:04:00	19.06.2013 11:10:00	11	6	24,95	1,33045E6	53324,4489	994,7883	253,17609
20.06.2013 12:28:00	19.06.2013 15:09:00	21.06.2013 09:47:00	11	7	39,37	2,09862E6	53304,95301	996,09851	254,13356
21.06.2013 22:37:30	21.06.2013 09:47:00	22.06.2013 11:28:00	11	8	23,72	1,27803E6	53879,84823	991,94708	254,82244

Рисунок 2.1 — Вид файла со статистическими данными эксперимента НЕВОД & ДЕКОР и значениями среднего атмосферного давления и среднемассовой температуры

Для оценки влияния метеопараметров на скорость счета направление движения частиц не учитывались в силу симметрии по азимутальному углу, что позволило увеличить количество рассматриваемых событий для пар СМ 06, 07, 16, 17, которые регистрируют относительно небольшое число мюонов.

Построены три серии графиков: для пар 06-07-16-17, 14-46, а также для пары 12. В каждой серии содержатся графики:

- изменения со временем скорости счета и среднего атмосферного давления;
- изменения со временем скорости счета и среднемассовой температуры;
- зависимость скорости счета от среднего атмосферного давления;
- зависимость скорости счета от среднемассовой температуры.

На рисунках 2.2 и 2.3 приведены зависимости скорости счета пар СМ 06-07-16-17 и пары СМ 12 и среднего атмосферного давления от времени.

На рисунках 2.4 и 2.5 приведены зависимости скорости счета пар СМ 06-07-16-17 и пары СМ 12 и среднемассовой температуры от времени.

Ниже на рисунках 2.6 и 2.7 в качестве примера приведены графики зависимости скорости счета от метеопараметров для пар СМ 06-07-16-17 и пары СМ 12.

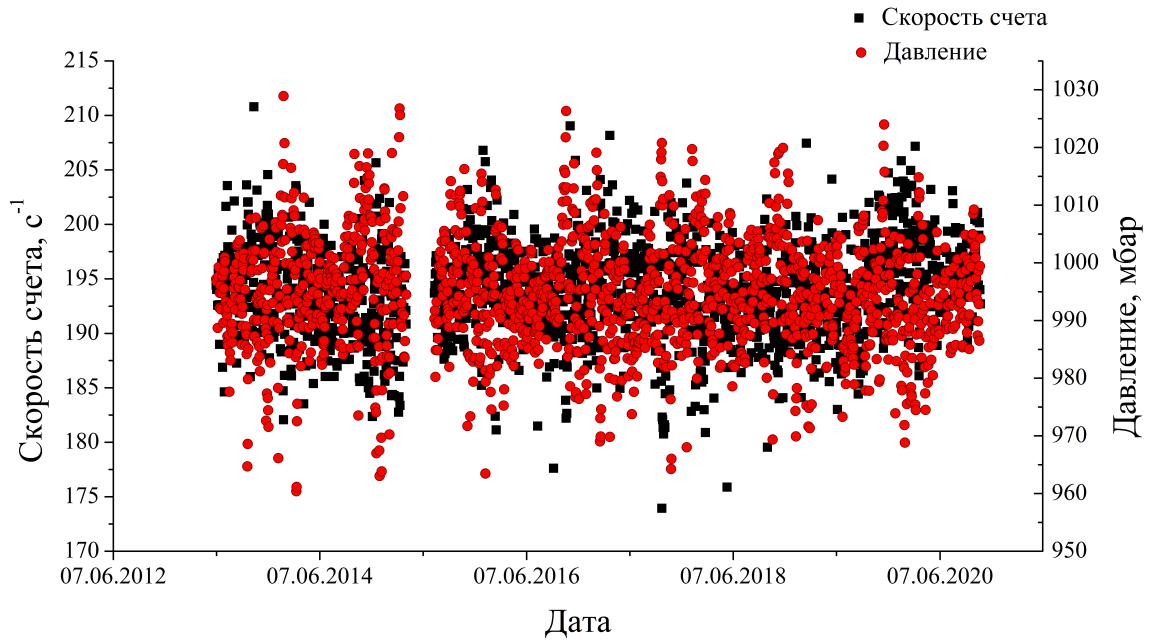


Рисунок 2.2 — Зависимость скорости счета пар СМ 06-07-16-17 и среднего атмосферного давления от времени

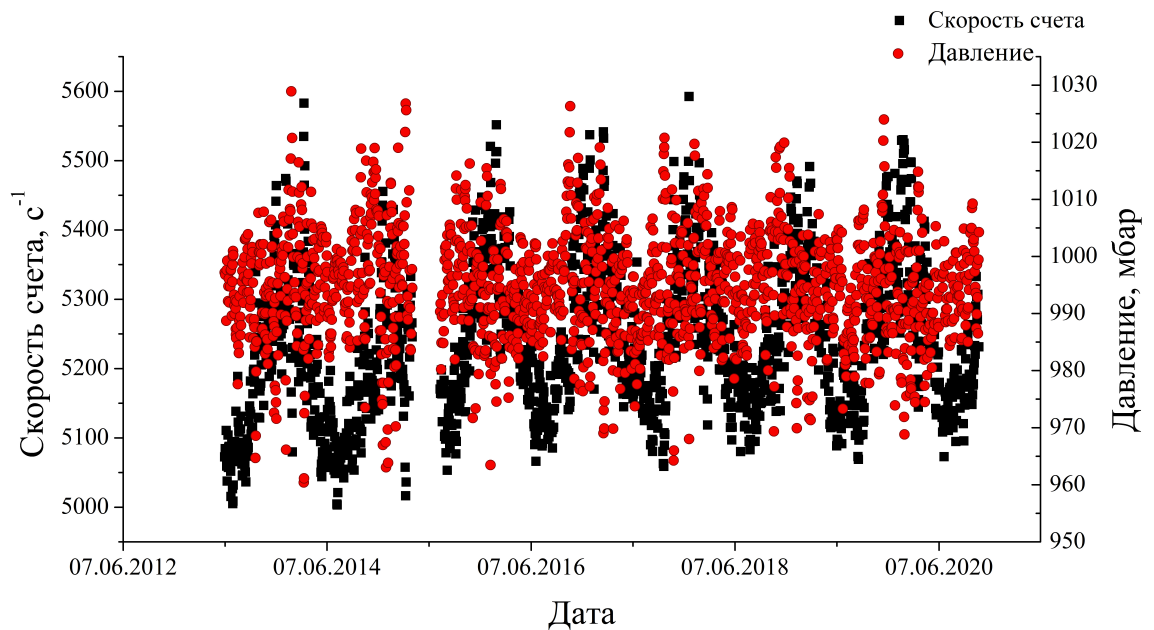


Рисунок 2.3 — Зависимость скорости счета пары СМ 12 и среднего атмосферного давления от времени

По наличию или отсутствию наклона можно оценить, оказывают ли метеоэффекты влияние на скорость счета. Присутствие обоих эффектов — температурного и барометрического — выявлено только для пары СМ 12, что связано с минимальной

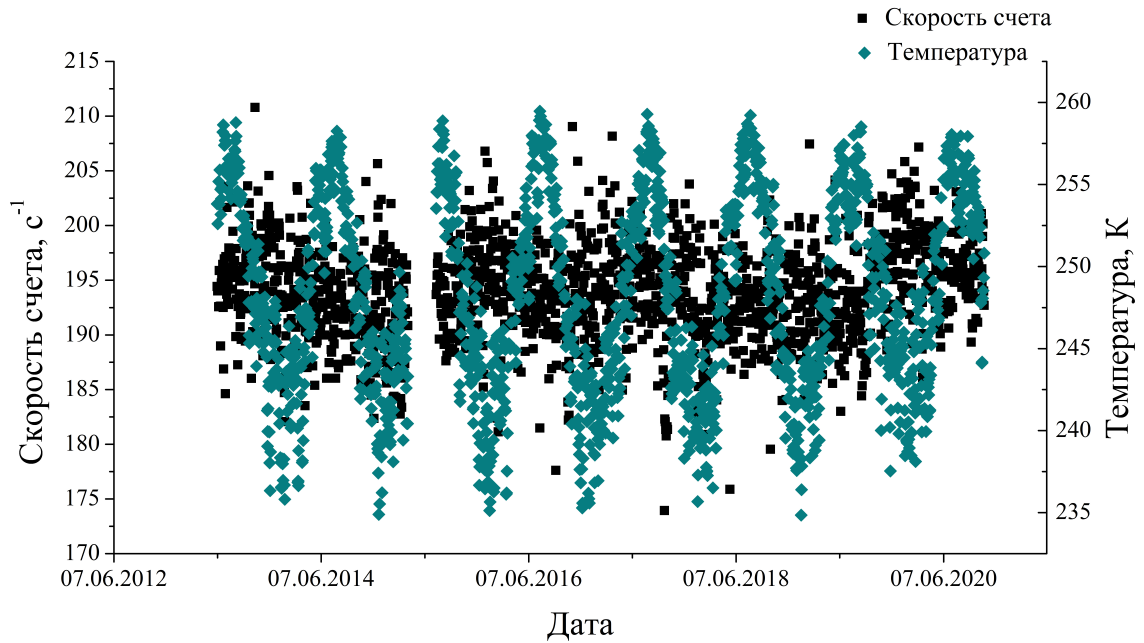


Рисунок 2.4 — Зависимость скорости счета пар СМ 06-07-16-17 и среднемассовой температуры от времени

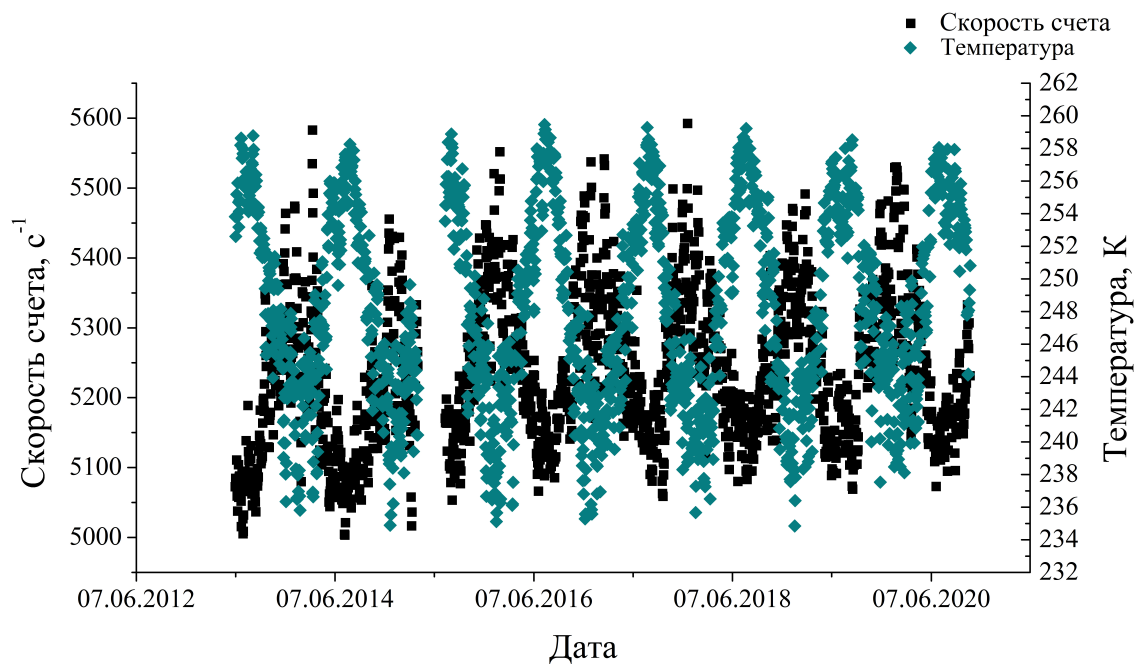
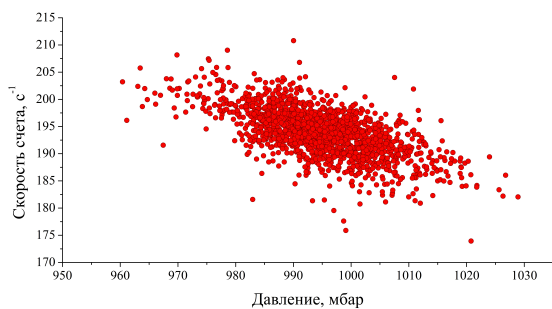
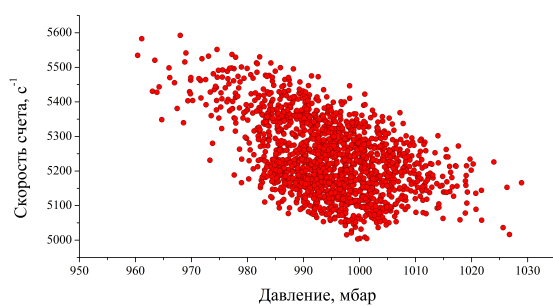


Рисунок 2.5 — Зависимость скорости счета пары СМ 12 и среднемассовой температуры от времени

пороговой энергией для этой пары. На скорость счета остальных пар заметное влияние оказывает только барометрический эффект. Уменьшить влияние метеозффектов

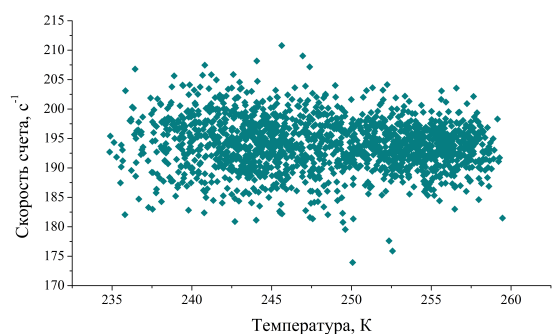


Пары SM 06-07-16-17

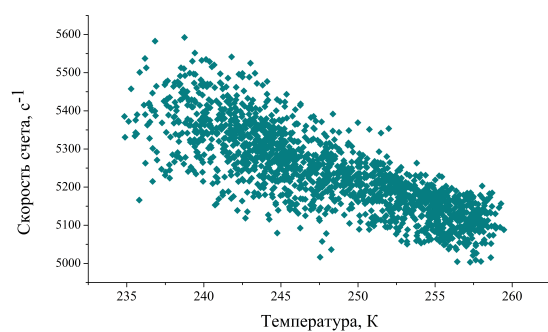


Пара SM 12

Рисунок 2.6 — Зависимость скорости счета мюонов от среднего атмосферного давления



Пары SM 06-07-16-17



Пара SM 12

Рисунок 2.7 — Зависимость скорости счета мюонов от среднемассовой температуры

можно несколькими способами: для всех дальнейших расчетов использовать интервалы кратные календарному году — в этом случае влияние метеопараметров усреднится, или ввести поправки на атмосферные эффекты. Решено использовать первый вариант.

3 АНАЛИЗ ТРЕКОВ ЧАСТИЦ

Следующим шагом стал анализ треков частиц, зарегистрированных парами СМ. Вид файла для каждого набора с исходными данными представлен на рисунке 3.1. Файлы находятся в трех папках, соответствующих одиннадцатой, двенадцатой и тринадцатой сериям, в каждой из которых находятся папки, соответствующие наборам. В последних находятся файлы с характеристиками треков частиц. Пример названия файла: “result_NAD_001.dat” — файл, соответствующий первому набору.

RUN[X]	Event[Y]	Date[Y]	Time[Y]	SM0[Y]	SM1[Y]	X0[Y]	Y0[Y]	Z0[Y]	X1[Y]	Y1[Y]	Z1[Y]	Teta[Y]	Phi[Y]
				SM 0	SM 1								
NAD 000	3	04.06.2013	13:13:19	1	2	9750	1826.68	4796.04	6500.8	-801	2918.34	65.8	38.96
NAD 000	6	04.06.2013	13:13:19	1	2	6406.38	-801	4991.67	9750	3878.57	4164.35	81.81	234.45
NAD 000	9	04.06.2013	13:13:20	1	2	9750	3444.06	4637.63	5656.48	-801	3414.28	78.28	46.04
NAD 000	11	04.06.2013	13:13:20	0	2	3202.16	-801	4061.15	9750	2455.73	3131.65	82.76	206.44
NAD 000	13	04.06.2013	13:13:20	1	2	9750	1825.37	2930.14	7741.01	-801	2728.61	86.51	52.59
NAD 000	21	04.06.2013	13:13:20	1	2	9750	1789.5	4953.6	7734.45	-801	3610.17	67.74	52.12
NAD 000	32	04.06.2013	13:13:21	1	2	9750	1736.93	4370.34	6329.7	-801	3551.41	79.12	36.58
NAD 000	56	04.06.2013	13:13:22	4	7	9748	14115.11	5132.69	2398.4	26812	3725.92	84.52	300.06
NAD 000	57	04.06.2013	13:13:22	5	6	9750	19740.13	3358.98	7962.93	26812	2940.54	86.72	284.18

Рисунок 3.1 — Вид файла с характеристиками треков частиц

Обозначения столбцов в файле:

- “RUN” — номер набора;
- “Event” — номер события;
- “Date”, “Time” — дата и время регистрации события;
- “SM0”, “SM1” — номера сработавших СМ;
- “X0”, “Y0”, “Z0”, “X1”, “Y1”, “Z1” — координаты трека частицы, зарегистрированные в SM0 и SM1;
- “Teta”, “Phi” — зенитный и азимутальный углы.

Исходные файлы содержат события, удовлетворяющие критерию “OneTrack”, то есть “критерию одного трека”, который заключается в требовании совпадения треков, восстановленных в разных СМ, в пределах конуса с раствором не более 5°. Если это условие выполняется, считается, что через пару СМ прошла одна частица, это не случайное совпадение, и за траекторию частицы принимается прямая, соединяющая середины треков, восстановленных в каждом СМ.

На рисунке 3.2 представлен пример трека мюона, зарегистрированного парой СМ 12 и удовлетворяющего критерию “OneTrack”. Синим цветом обозначены треки, восстановленные разными СМ, зеленым — общий трек.

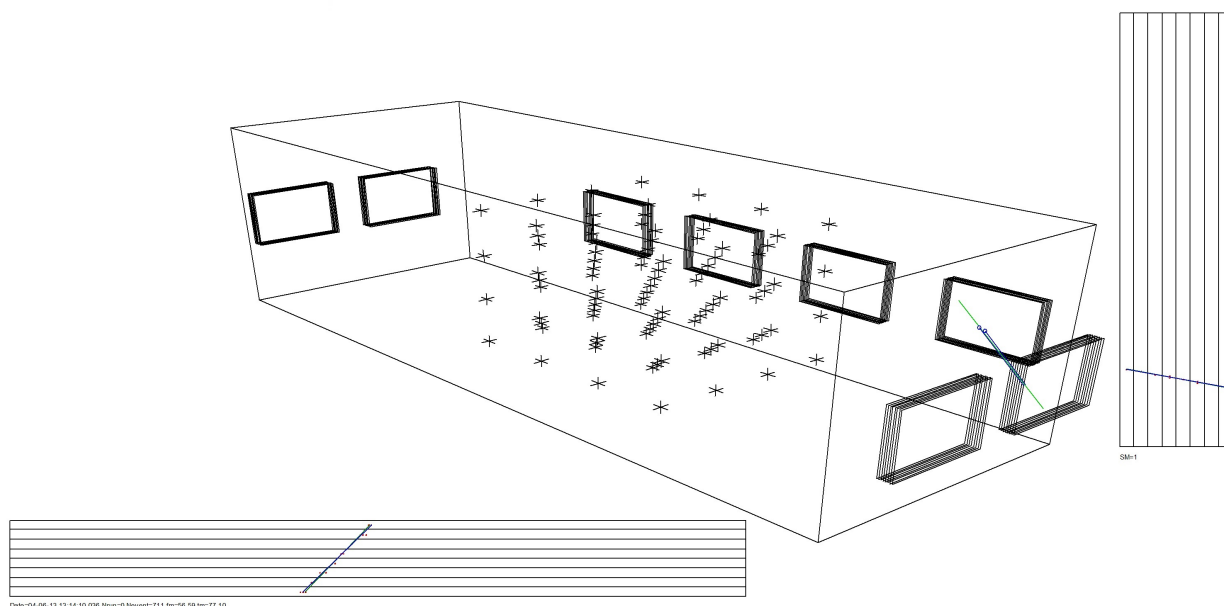


Рисунок 3.2 — Трек мюона, удовлетворяющий критерию “OneTrack”

3.1 УМЕНЬШЕНИЕ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ

Для уменьшения влияния краевых эффектов была написана функция на языке C++ [6], которая осуществляет проверку прохождения трека каждой частицы через внешние плоскости CM не ближе 4 см от координат крайних стрипов — условие “bound”. Последние были рассчитаны для каждого CM относительно его опорной точки путем добавления размеров плоскостей и расстояния между нулевой и седьмой плоскостями. За опорную точку принимается нижняя правая (вид изнутри бассейна) точка ближайшей к бассейну плоскости.

3.2 РАСЧЁТ ПОРОГОВОЙ ЭНЕРГИИ

Далее была написана функция, осуществляющая расчет пороговой энергии — минимальной энергии, необходимой для прохождения заряженной частицы через вещество.

При создании программы были использованы предоставленные научным руководителем материалы, а именно: схемы здания и экспериментальной установки НЕВОД & ДЕКОР, координаты всех их составных частей, функции для расчета потерь энергии в веществе, функцию, рассчитывающую геометрический путь частицы в заданном объеме.

Пример трека частицы и пересекаемых объемов представлен на рисунке 3.3.

Здесь $T_{\text{мин}}$ (~ 300 МэВ) — увеличение пороговой энергии, которого требует критерий объединения треков, так как если энергия мюона на вылете из бассейна равна

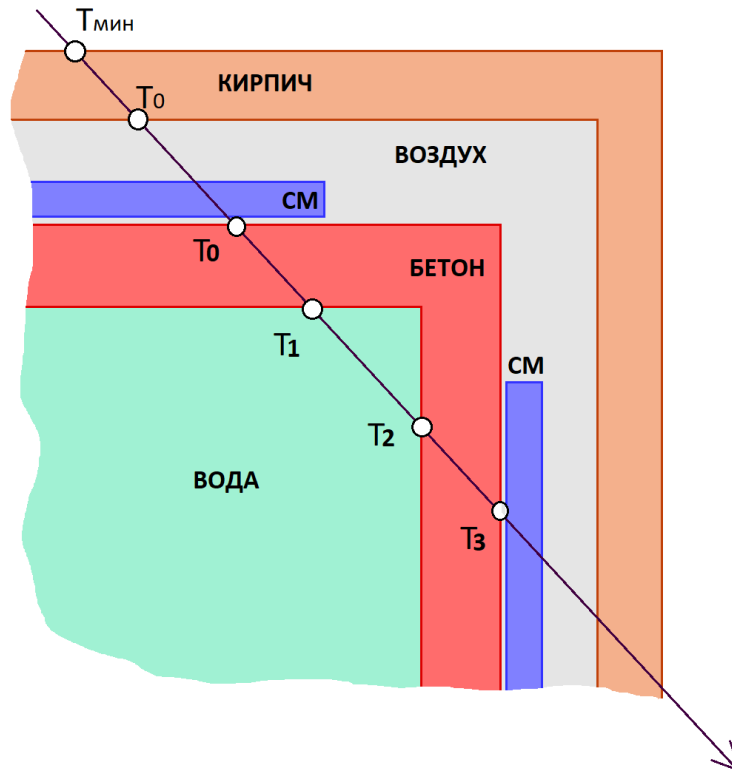


Рисунок 3.3 — Схема прохождения мюона через пару СМ, части здания и установки НЕВОД & ДЕКОР

нулю, то вероятность того, что он рассеется на угол меньше 5° , очень мала. Значения $T_{\text{мин}}$ предоставлены научным руководителем [4]. T_0 — энергия частицы после прохождения кирпичной стены здания. Кирпич — SiO_2 , плотность $\rho = 1.8 \text{ г/см}^3$, толщина стен $d = 55 \text{ см}$. Потерями энергии мюонов в воздухе и супермодуле пренебрегаем. T_1 — энергия частицы после прохождения бетонной стены бассейна, плотность $\rho = 2.1 \text{ г/см}^3$, толщина стен $d = 60 \text{ см}$. T_2 — энергия частицы после прохождения слоя воды, плотность $\rho = 1 \text{ г/см}^3$. $T_3 = T_{\text{пор}}$ — энергия после прохождения второй бетонной стены бассейна. Значение $T_{\text{пор}}$ — искомое значение пороговой энергии.

В написанную функцию расчета пороговой энергии передаются номера СМ, зарегистрировавших событие, и координаты X , Y , Z середины треков, восстановленных в каждом СМ. По порядку срабатывания СМ (считается, что частица движется исключительно сверху вниз) определяется очередность пересечения мюоном частей здания и установки. Далее с помощью функции, рассчитывающей геометрический путь частицы в заданном объеме, проверяется, действительно ли частица пересекла данный объем и каков ее путь в нем. Затем геометрический путь умножается на плотность соответствующего материала и передается в функцию расчета энергии (своя для каждого материала). Энергии в каждом пересекаемом мюоном объеме последовательно пересчитываются, в итоге получаем пороговую энергию. При расчете используются табличные данные пробега мюонов в веществе [7].

Далее была написана программа, позволяющая отсортировать события по парам

СМ, найти минимальные и максимальные значения зенитного и азимутального углов, координаты Z, а также пороговой энергии. Все указанные максимальные и минимальные значения записаны в два файла: в первом частицы летят от СМ с меньшим номером к СМ с большим номером, во втором — наоборот. Вид файлов представлен на рисунках 3.4 и 3.5.

SM0[X]	SM1[Y]	Tetamin[Y]	Tetamax[Y]	Phimin[Y]	Phimax[Y]	Zmin[Y]	Zmax[Y]	Tmin[Y]	Tmax[Y]
		Teta min	Teta max	Phi min	Phi max	Z min	Z max	T min	T max
0	2	71,88	90	196,85	219,94	2624,99	5240,64	2355,47464	3064,23575
0	3	76,36	90	221,15	238,66	2633,9	5238,92	2779,75557	3674,1619
0	4	80,49	90	235,36	247,79	2622,76	5240,38	3833,17209	4658,14316
0	5	82,74	90	243,67	252,9	2639,58	5238,95	5048,6979	5733,88023
0	6	84,77	90	255,35	267,04	2622,96	5239,62	7037,10583	7284,10957
0	7	84,73	90	263,88	275,98	2642,86	5239,58	7026,76951	7091,24051
1	2	57,16	90	210,85	250,05	2615,92	5238,86	1218,72561	2122,49734
1	3	74,82	90	239,9	259,51	2625,63	5235,9	2450,89675	3058,0409
1	4	80,09	90	250,73	262,05	2636,02	5235,43	3706,6782	4153,1422
1	5	82,89	89,99	255,91	262,01	2672,91	5229,95	5020,86029	5356,81629
1	6	84,73	90	263,94	276	2641,29	5238,79	7026,76949	7093,09294
1	7	84,77	90	272,83	284,57	2618,52	5237,85	7036,2067	7279,18875
2	6	84,19	89,98	278,12	281,17	2807,11	5215,13	6299,73083	6818,68036
2	7	84,09	90	284,01	291,41	2631	5217,22	6652,42963	7155,85744
3	6	82,62	90	277,97	284,37	2706,01	5209,53	5524,78503	6368,90479
3	7	82,56	90	287,35	296,84	2633,47	5228,24	5310,81875	5913,49215
4	6	79,83	90	278,05	289,86	2633,53	5208,69	3976,64778	5092,17223
4	7	80,17	90	292,7	305,53	2641,32	5225,55	3953,87577	4706,12974
5	6	73,85	90	280,84	301,5	2625,09	5233,14	2578,69608	3566,60114
5	7	75,97	90	302,36	320,44	2624,74	5236,88	2739,90647	3621,08821

Рисунок 3.4 — Вид файла, содержащего максимальные и минимальные значения зенитного и азимутального углов, пороговых энергий и координаты Z для каждой пары СМ (частицы летят от СМ с меньшим номером)

SM0[X]	SM1[Y]	Tetamin[Y]	Tetamax[Y]	Phimin[Y]	Phimax[Y]	Zmin[Y]	Zmax[Y]	Tmin[Y]	Tmax[Y]
		Teta min	Teta max	Phi min	Phi max	Z min	Z max	T min	T max
2	0	71,98	90	16,85	39,95	2621	5235,17	2355,32609	3054,48098
3	0	76,44	90	41,16	58,64	2636,69	5228,85	2781,61195	3679,9592
4	0	80,58	90	55,37	67,78	2628,83	5226,87	3837,46615	4644,28464
5	0	82,89	90	63,66	72,91	2681,3	5228,39	5052,62984	5743,25741
6	0	84,78	90	75,33	87,02	2647,51	5227,36	7036,96784	7285,51239
7	0	84,75	90	83,92	95,97	2657,86	5233,59	7026,77073	7089,37267
2	1	57,35	90	30,86	70,05	2617,11	5234,43	1217,34198	2123,02503
3	1	74,87	90	59,88	79,5	2630,37	5225,93	2451,23487	3055,87804
4	1	80,27	90	70,73	81,9	2642,18	5213,59	3705,51592	4144,41071
5	1	82,97	89,98	75,92	81,97	2679,72	5229,33	5024,41988	5363,005
6	1	84,76	90	83,94	95,98	2630,34	5228,34	7026,76937	7091,02255
7	1	84,79	90	92,83	104,59	2636,1	5233,01	7035,85548	7283,54563
6	2	84,38	90	98	101,18	2881,98	5210,46	6306,23084	6840,39276
7	2	84,21	90	104,03	111,42	2687,07	5228,26	6650,80594	7153,37205
6	3	82,65	90	98,17	104,34	2679,9	5223,86	5520,78615	6346,90785
7	3	82,66	90	107,36	116,81	2655,43	5235,41	5311,48755	5904,99997
6	4	79,87	90	98,08	109,88	2666,05	5224,11	3981,09082	5071,52564
7	4	80,13	90	112,71	125,54	2635,2	5233,9	3953,54778	4716,835
6	5	73,98	90	100,87	121,51	2627,27	5230,47	2579,60369	3547,83811
7	5	76	90	122,34	140,46	2618,87	5232,36	2736,56848	3619,95126

Рисунок 3.5 — Вид файла, содержащего максимальные и минимальные значения зенитного и азимутального углов, пороговых энергий и координаты Z для каждой пары СМ (частицы летят от СМ с большим номером)

Обозначения столбцов в файле:

- “SM0”, “SM1” — номера сработавших СМ;
- “Tetamin”, “Tetamax” — минимальный и максимальный зенитные углы;
- “Phimin”, “Phimax” — минимальный и максимальный азимутальные углы;
- “Zmin”, “Zmax” — минимальное и максимальное значения координаты Z;
- “Tmin”, “Tmax” — минимальное и максимальное значения пороговой энергии.

4 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕКОВ МЮОНОВ ПО УГЛАМ И ЭНЕРГИЯМ

Для получения распределения треков мюонов по энергиям, зенитному и азимутальному углам написана программа, осуществляющая построение гистограмм.

На данный момент обработаны данные пары СМ 12, так как она обладает минимальной пороговой энергией и большим количеством событий.

Для построения гистограмм все события пары СМ 12 записаны в трехмерный массив следующим образом. Сначала были выбраны оптимальные размерности массива и шаг по энергии и углам.

Размерность по энергии: $\frac{T_{\text{макс}} - T_{\text{мин}}}{50 \text{ МэВ}} = 22$, где 50 МэВ — шаг по энергии.

Размерность по зенитному углу: $\frac{\theta_{\text{макс}} - \theta_{\text{мин}}}{1^\circ} = 35$, где 1° — шаг по зенитному углу.

Размерность по азимутальному углу: $\frac{\varphi_{\text{макс}} - \varphi_{\text{мин}}}{1^\circ} = 240$, где 1° — шаг по азимутальному углу.

Далее пороговая энергия, зенитный и азимутальный углы для каждой частицы были записаны в соответствующий массив с номерами ячеек:

по энергии: $\left[\frac{T_{\text{пор}} - T_{\text{пор}}^{\text{мин}}}{50 \text{ МэВ}} \right]$, где $T_{\text{пор}}$ — пороговая энергия данной частицы;

по зенитному углу: $\left[\frac{\theta - \theta_{\text{мин}}}{1^\circ} \right]$, где θ — зенитный угол трека данной частицы;

по азимутальному углу: $\left[\frac{\varphi - \varphi_{\text{мин}}}{1^\circ} \right]$, где φ — азимутальный угол трека данной частицы.

Квадратные скобки обозначают целую часть.

Полученная гистограмма записана в бинарный файл.

Для чтения гистограммы из бинарного файла и построения распределения написана отдельная программа. После чтения гистограммы в специальный массив эта программа позволяет построить распределение треков мюонов по зенитному углу (рисунок 4.1), а также распределение по азимутальному углу (рисунок 4.2).

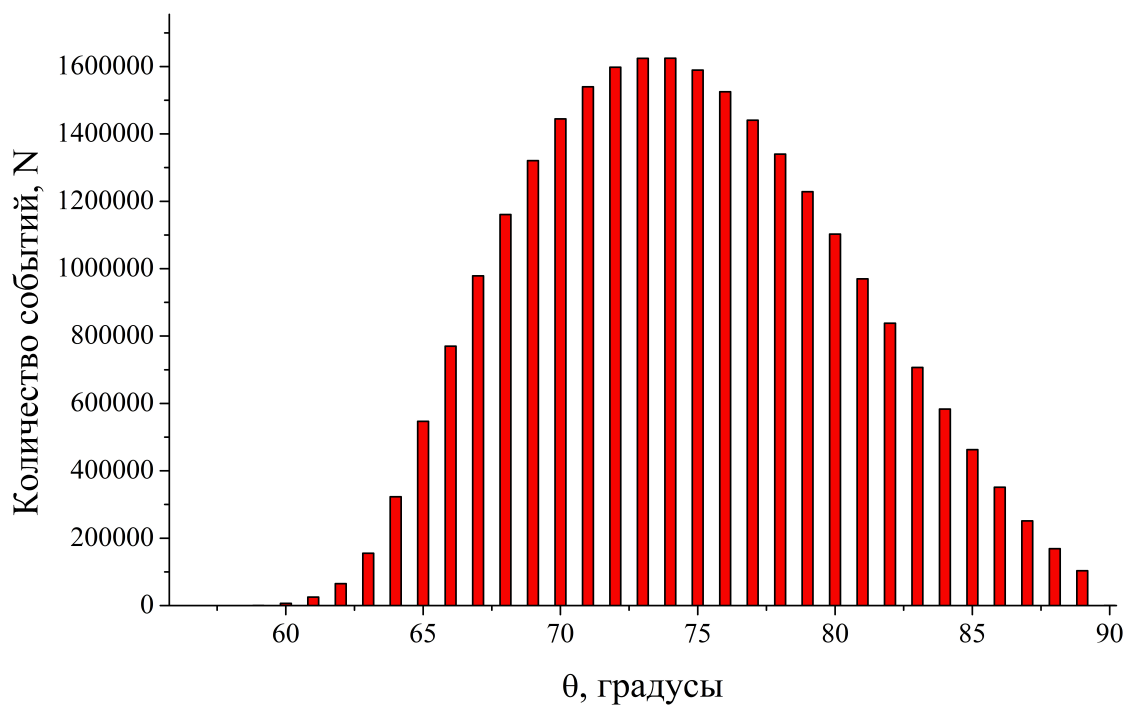


Рисунок 4.1 — Распределение треков мюонов, зарегистрированных парой СМ 12, по зенитному углу

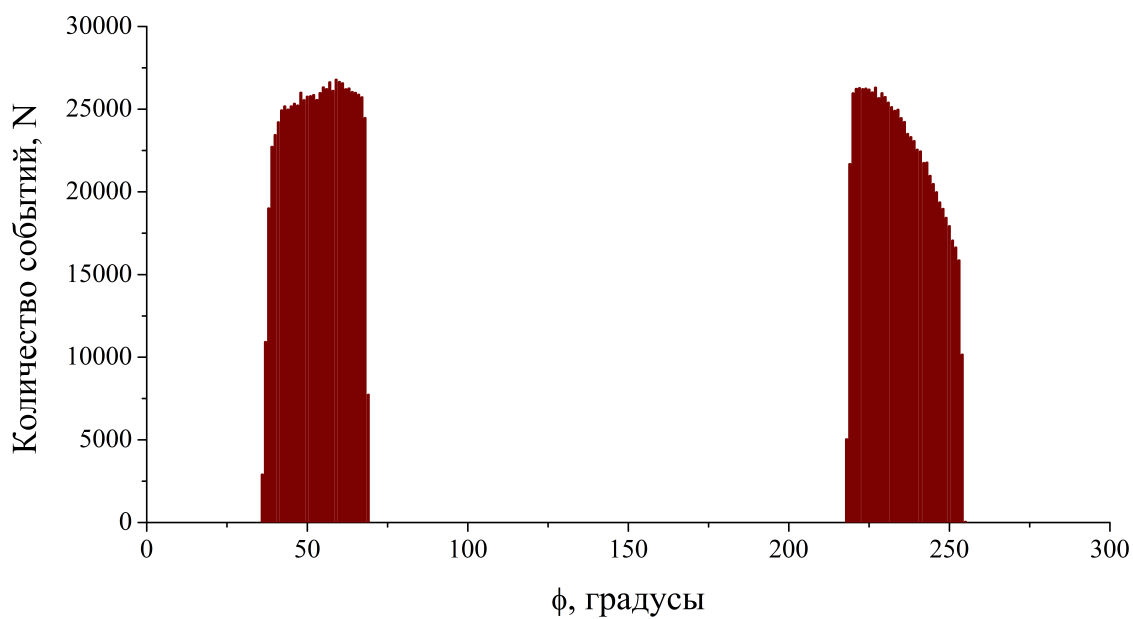


Рисунок 4.2 — Распределение треков мюонов, зарегистрированных парой СМ 12, по азимутальному углу

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были получены следующие результаты:

- Освоена работа с большим массивом файлов данных, для чего была написана программа на C++.
- Обработаны статистические данные эксперимента НЕВОД&ДЕКОР за 2013 - 2020 гг.
- Построены зависимости скорости счета разных пар СМ от давления и температуры атмосферы.
- Написана функция, осуществляющая проверку прохождения трека каждой частицы через СМ с учетом условия “bound”.
- Написана функция для расчета пороговой энергии частицы.
- Для пары СМ 12 построено распределение интенсивности потока мюонов по зенитному углу и по азимутальному углу.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *В.В.Борог*. Основы мюонной диагностики: Учебное пособие. — М.: МИФИ, 2008.
2. Координатный детектор для исследования горизонтального потока космических лучей / Н.С.Барбашина [и др.] // Приборы и техника эксперимента. — 2000. — № 6. — С. 20—24.
3. Уникальная научная установка «Экспериментальный комплекс НЕВОД». — 2021. — Дата обращения 24.05.2021. <http://ununevod.mephi.ru/ru/>.
4. *А.Н.Дмитриева*. Интенсивность потока и энергетический спектр мюонов космических лучей под большими зенитными углами. Кандидатская диссертация, НИЯУ МИФИ / А.Н.Дмитриева. — НИЯУ МИФИ, 2008.
5. NOAA Air Resources Laboratory (ARL). — 2004. — Дата обращения 24.05.2021. <https://www.ready.noaa.gov/gdas1.php>.
6. *В.В.Подбельский*. Язык C++. — М.: Финансы и статистика, 2001.
7. *D.E.Groom, N.V.Mokhov, S.I.Striganov*. Muon stopping power and range tables 10 MeV–100 TeV // Atomic Data and Nuclear Data Tables. — 2001. — № 78. — С. 183—365.