

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 2020

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>1 Введение</b>	<b>2</b>
1 Экспериментальная установка . . . . .	3
2 Метеоэффекты . . . . .	5
<b>2 Влияние метеоэффектов на интенсивность потока мюонов</b>	<b>6</b>
1 Знакомство с данными . . . . .	6
2 Барометрический эффект . . . . .	7
3 Температурный эффект . . . . .	10
<b>Заключение</b>	<b>14</b>
<b>Список использованных источников</b>	<b>15</b>



# 1 ВВЕДЕНИЕ

Мюон ( $\mu$ ) – 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  $\pi$ -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 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

ДЕКОР [1] – координатный детектор большой площади – входит в состав экспериментального комплекса (ЭК) НЕВОД [2] 1.1 и представляет восемь супермодулей, расположенных в галереях вокруг черенковского водного калориметра НЕВОД (бассейн объемом  $2000 \text{ м}^3$ , в котором размещена пространственная решетка квазисферических модулей (КСМ), регистрирующих черенковское излучение). ДЕКОР расположен на высоте 173 м над уровнем моря.

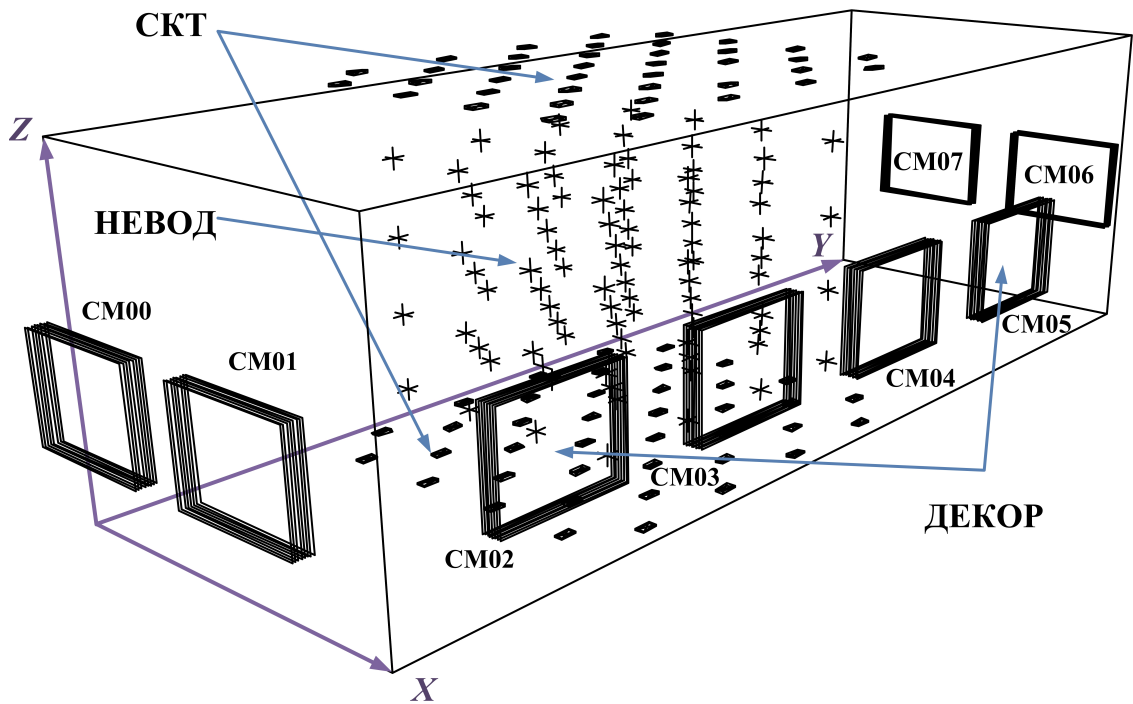


Рисунок 1.1 – Экспериментальный комплекс НЕВОД-ДЕКОР

Каждый супермодуль (СМ) 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  $\text{Ar}, \text{CO}_2, \text{n-пентан}$  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.

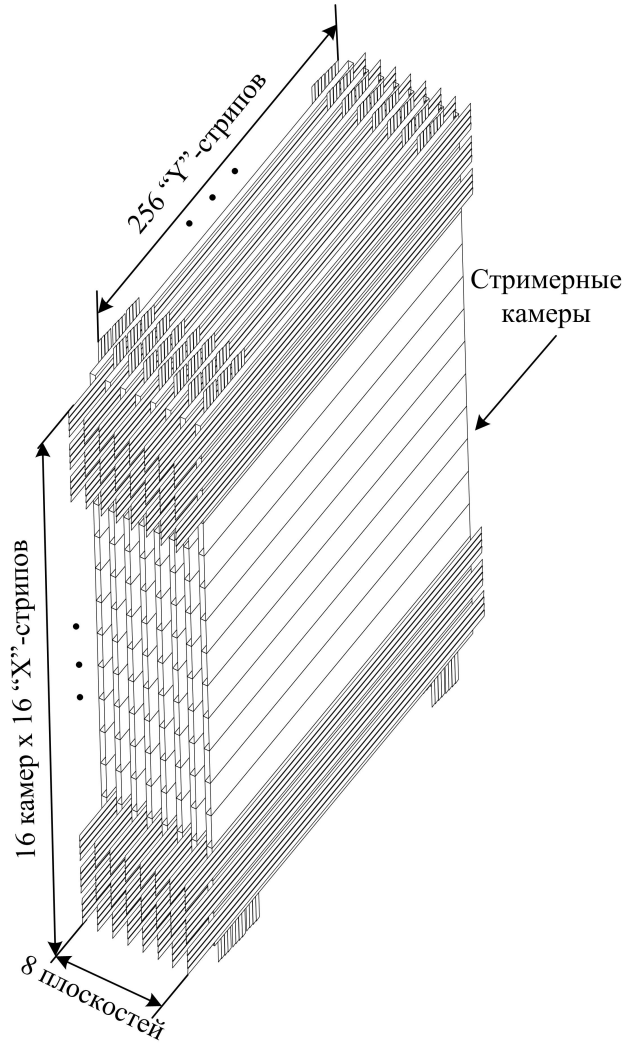


Рисунок 1.2 — Супермодуль установки ДЕКОР

ДЕКОР позволяет измерить поток мюонов при больших зенитных углах  $\theta$ . Абсолютная интенсивность мюонов  $I(\theta, \varphi, E_{\min})$  для зенитного  $\theta$  и азимутального  $\varphi$  углов прихода частиц, и пороговой энергии  $E_{\min}$  рассчитывается по формуле:

$$I(\theta, \varphi, E_{\min}) = \frac{N(\theta, \varphi, E_{\min})}{T \cdot \varepsilon_{\text{СМ1}} \cdot \varepsilon_{\text{СМ2}} \cdot S\Omega(\theta, \varphi, E_{\min})}, \quad (1.1)$$

где  $N(\theta, \varphi, E_{\min})$  – число событий, зарегистрированных в данных угловых и энергетическом интервалах,  $T$  – “живое” время измерений. Коэффициенты  $\varepsilon_{\text{СМ1,2}}$  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  $\theta$  для получения зависимости по зенитному углу  $\theta$  используются усредненные по азимутальному углу значения.

## 1.2 МЕТЕОЭФФЕКТЫ

На интенсивность потока мюонов наибольшее влияние оказывают барометрический и температурный эффекты [3]. В основном, знания о влиянии этих факторов используют для учета поправок полной интенсивности потока мюонов и нейтронов при их регистрации в атмосфере Земли. Принято считать, что малые колебания приземного атмосферного давления  $P$  и среднemasсовой температуры атмосферы  $T$  аддитивно влияют на изменение интегральной интенсивности мюонов:

$$\frac{\Delta N_\mu}{\langle N_\mu \rangle} \cdot 100\% = \beta_P \Delta P + \beta_T \Delta T, \quad (1.2)$$

где  $\Delta P$  – изменение атмосферного давления на уровне наблюдения;  $\Delta T$  – изменение среднemasсовой температуры атмосферы;  $\beta_P, \beta_T$  – барометрический (%/мбар) и температурный (%/K) коэффициенты.

Барометрический коэффициент показывает, на сколько процентов изменится интенсивность потока мюонов при изменении давления на 1 мбар.

Температурный коэффициент показывает, на сколько процентов изменится интенсивность потока мюонов при изменении среднего по атмосфере значения температуры на 1K.

Барометрический эффект – связь атмосферного давления с интенсивностью потока мюонов. С увеличением давления возрастает количество вещества на пути мюонов, возрастают потери энергии, увеличивается пороговая энергия мюона для прохождения через атмосферу, и поток мюонов на поверхности Земли уменьшается. Уменьшение атмосферного давления приводит к противоположным изменениям интенсивности потока мюонов.

Влияние температурного эффекта имеет более сложный характер. С ростом температуры атмосфера расширяется, и уровень генерации пионов от первичных частиц ГКЛ поднимается. Возникающие при распаде мюоны проходят больший геометрический путь до поверхности Земли – вероятность распада мюона увеличивается. С другой стороны, уменьшается плотность в верхних слоях атмосферы – вероятность распада мюона снижается. В итоге знак температурного эффекта зависит от пороговой энергии регистрации мюонов на поверхности Земли. Для рассматриваемой установки пороговые энергии принимают значения от 1 до 10 ГэВ. Для этого диапазона более существенным оказывается фактор увеличения геометрического пути мюона – температурный коэффициент отрицателен.

# 2 ВЛИЯНИЕ МЕТЕОЭФФЕКТОВ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ПОТОКА МЮОНОВ

## 2.1 ЗНАКОМСТВО С ДАННЫМИ

В данной работе были проанализированы экспериментальные данные совместного триггера координатного детектора ДЕКОР и ЧВД НЕВОД начиная с июня 2013г. и заканчивая октябрем 2020 г. Всего обработано около 50 тыс. часов. Данные эксперимента представляют собой серии, состоящие из наборов, каждый из которых длится от нескольких часов до нескольких суток.

Nabor[X]	Start[Y]	Stop[Y]	Fullthour[Y]		Lifethour[Y]		Lifet[Y]		N12d[Y]		N9d[Y]		Ngood12d[Y]		Ngood9d[Y]		Nnoise[Y]	Nevent[Y]
			Full t_hour	Life t_hour	Life t_%	N 12d	N 9d	Ngood 12d	Ngood 9d									
NAD 000	04.06.13 13:12	06.06.13 14:36	49,4	45,69	92,49	546	546	540	536	3	2,30014E6							
NAD 001	06.06.13 14:36	08.06.13 14:42	48,1	44,46	92,43	546	546	539	536	5	2,26245E6							
NAD 002	10.06.13 05:13	12.06.13 02:56	45,71	42,15	92,2	546	546	537	533	6	2,20976E6							
NAD 003	12.06.13 02:56	14.06.13 00:27	45,52	41,96	92,19	546	546	540	535	6	2,18336E6							
NAD 004	14.06.13 00:27	15.06.13 12:35	36,15	33,34	92,24	546	546	538	534	6	1,72627E6							
NAD 005	17.06.13 05:01	18.06.13 06:51	25,82	23,8	92,14	546	546	537	534	7	1,26103E6							
NAD 006	18.06.13 08:04	19.06.13 11:10	27,09	24,95	92,1	546	546	535	532	7	1,33045E6							
NAD 007	19.06.13 15:09	21.06.13 09:47	42,63	39,37	92,36	546	546	533	530	6	2,09862E6							
NAD 008	21.06.13 09:47	22.06.13 11:28	25,69	23,72	92,31	546	546	538	535	6	1,27803E6							

Рисунок 2.1 — Вид файла со статистическими данными эксперимента НЕВОД & ДЕКОР

На рисунке 2.1 представлен вид файла со статистическими данными серии. Обозначения столбцов в файле:

- “Nabor” – номер набора;
- “Start” – дата и время начала набора;
- “Stop” – дата и время окончания набора;
- “Full\_t, hour” – общее время набора в часах;
- “Life\_t, hour” – “живое” время набора в часах;
- “Life\_t, %” – доля живого времени в общей продолжительности набора;
- “Nevent” – количество зарегистрированных событий общего триггера НЕВОД & ДЕКОР;
- “N\_12d”, “N\_9d” – общее количество работающих каналов фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) ЧВД НЕВОД для 12-го и 9-го динодов;
- “Ngood\_12d”, “Ngood\_9d” – количество “хороших” каналов ФЭУ, прошедших критерий по шумовым характеристикам;
- “Nnoise” – количество “шумящих” ФЭУ;

Параметры “N\_12d”, “N\_9d”, “Ngood\_12d”, “Ngood\_9d”, “Nnoise” в данной работе не рассматривались.

Каждый набор несет информацию о количестве зарегистрированных событий, о живом времени работы установки. Для вычисления последнего из общего времени работы вычитается время, затрачиваемое установкой на сохранение событий и на мониторинг.

На первом шаге обработки данных для каждого набора была рассчитана скорость счета – количество событий в единицу времени, а также найден “временной центр” между началом и окончанием каждого набора – момент времени используемый для построения графиков.

На графике 2.2 приведена статистика продолжительности наборов за указанное время эксперимента.

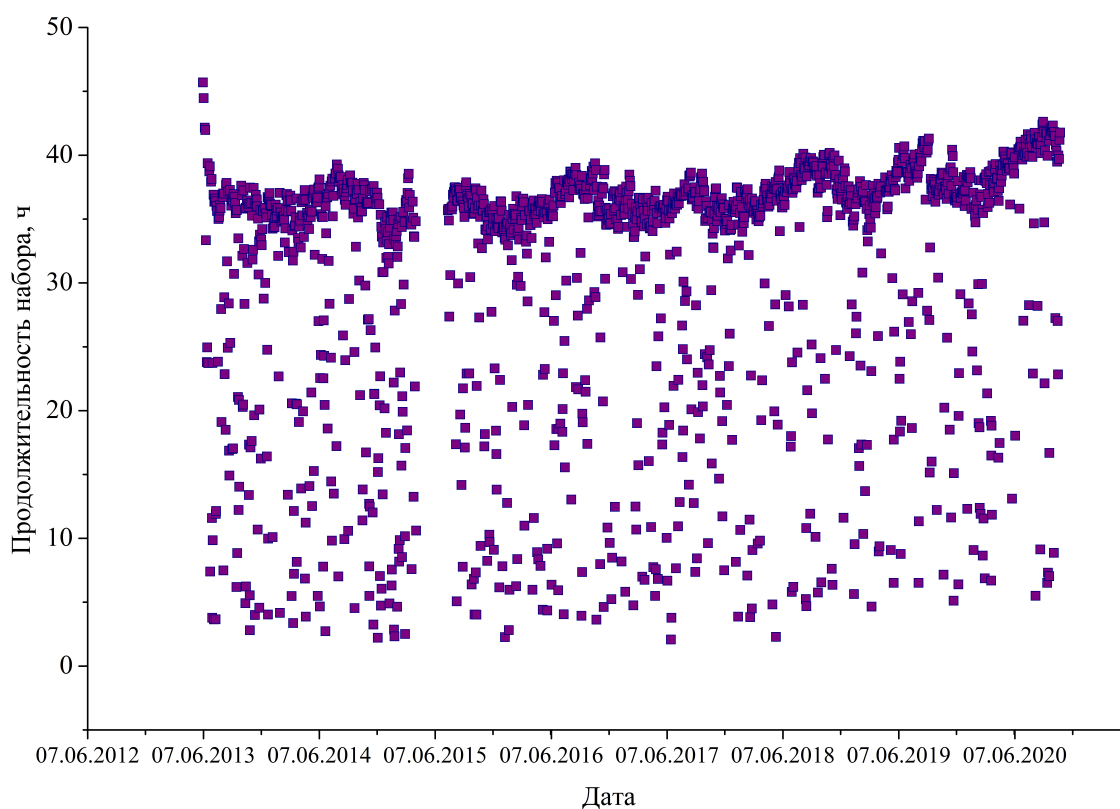


Рисунок 2.2 — Продолжительность наборов

## 2.2 БАРОМЕТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

В данной работе были использованы данные об атмосферном давлении в месте расположения установки, пример файла с данными приведен в таблице 2.1.

– “DateTime” – время и дата измерения;

– “Pdatch” – значение давления в мм.рт.ст;

остальные данные не использовались.

Частота фиксации давления датчиком в среднем 3 измерения в минуту. Продолжительность наборов сильно превышает период измерения давления. Поэтому для расчета среднего атмосферного давления для каждого набора была написана программа на языке C++, отбирающая измерения давления, входящие во временной интревал между началом и окончанием набора.

Написанная программа учитывает такие особенности наборов, как смена месяца и года, открывает соответствующие файлы, перед этим закрывая прочитанные. Вычисление среднего давления проводилось путем суммирования измерений давления в моменты времени, входящие во временной интервал соответствующего набора, и деления этой суммы на общее количество измерений давления в этом интервале. Полученное значение затем пересчитывалось из мм.рт. ст. в мбар.

Таблица 2.1 — Вид файла с данными по атмосферному давлению

DateTime	PD	TD	Pdatch	Temper
30.01.2007 10:17:28	1113.30	485.00	738.44	21.937500
30.01.2007 10:17:50	1113.30	484.50	738.43	21.937500
30.01.2007 10:18:12	1113.30	484.50	738.43	22.000000
30.01.2007 10:18:34	1113.25	484.50	738.41	21.937500
30.01.2007 10:18:56	1113.30	484.50	738.43	22.000000
30.01.2007 10:19:18	1113.30	484.50	738.43	21.937500
30.01.2007 10:19:40	1113.35	484.50	738.45	22.000000
30.01.2007 10:20:02	1113.30	484.50	738.43	21.937500
30.01.2007 10:20:24	1113.30	484.50	738.43	22.062500
30.01.2007 10:20:46	1113.30	485.00	738.44	22.000000

Изменение скорости счета триггера в зависимости от атмосферного давления отражено на графике 2.3

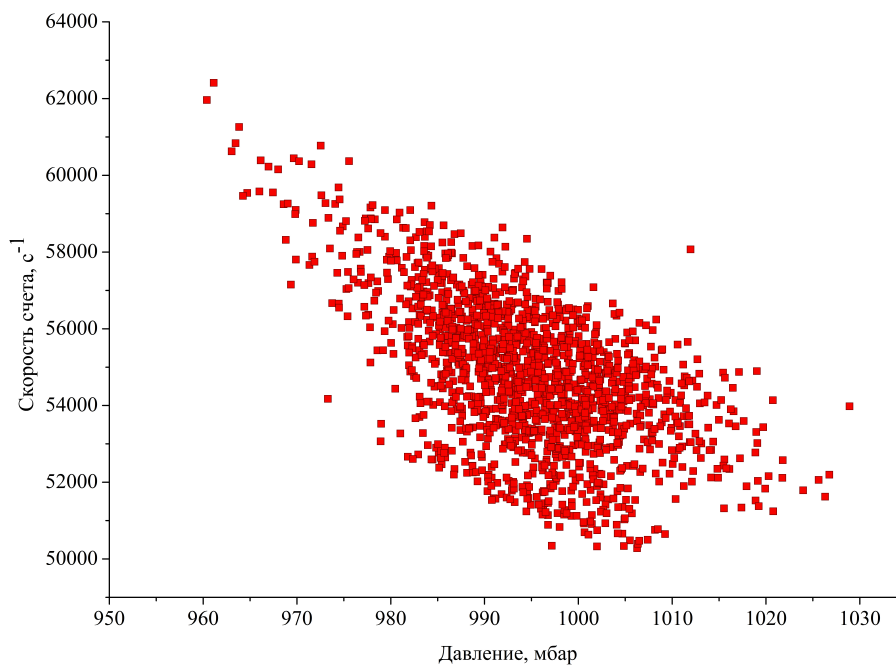


Рисунок 2.3 — Зависимость скорости счета от давления

На графике 2.4 показано, как со временем изменяются скорость счета триггера и давление.

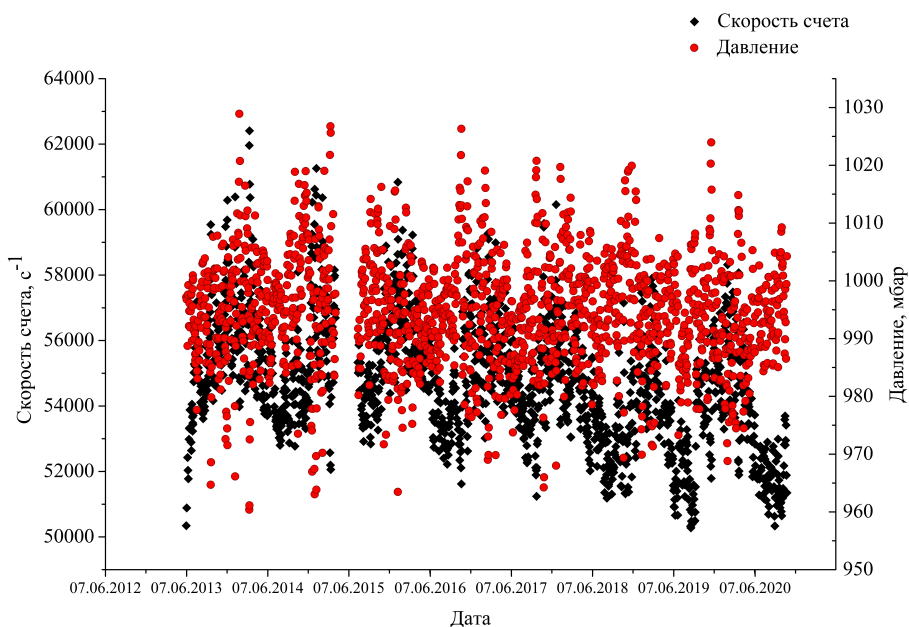


Рисунок 2.4 — Временные ряды интенсивности мюонов и атмосферного давления



## 2.3 ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ЭФФЕКТ

Оценка температурного эффекта потребовала применения метода линейной интерполяции для вычисления среднemasсовой температуры атмосферы.

В настоящей работе использовались данные о температурном профиле атмосферы с периодичностью 3 часа, причем каждый такой набор содержит информацию о температуре и давлении на высотах от 0 до 25 км над уровнем моря (таблица 2.2).

Таблица 2.2 — Вид файла с данными по температурному профилю атмосферы

PresLev	Tr,K	Tr,C	LevH	FT,h	FN,h
20	20	-69.56	25134.9	0	0
50	200.91	-72.24	19744.3	0	0
100	204.60	-68.55	15649.6	0	0
150	209.49	-63.66	13186.5	0	0
200	205.90	-67.25	11441.7	0	0
250	212.61	-60.54	10078.8	0	0
300	222.29	-50.86	8918.9	0	0
350	230.90	-42.25	7896.7	0	0
400	238.49	-34.66	6979.1	0	0
450	245.29	-27.86	6144.9	0	0
500	250.70	-22.45	5379.8	0	0
550	254.30	-18.85	4674.3	0	0
600	257.30	-15.85	4022.1	0	0
650	261.09	-12.06	3414.1	0	0
700	264.01	-9.14	2843.8	0	0
750	266.39	-6.76	2307.7	0	0
800	268.80	-4.35	1801.3	0	0
850	270.11	-3.04	1321.6	0	0
900	269.51	-3.64	869.1	0	0
925	270.12	-3.02	652.7	0	0
950	271.52	-1.63	440.8	0	0
975	272.95	-0.20	233.2	0	0
1000	274.12	0.98	29.8	0	0
1050	272.45	-0.70	0	0	0

Здесь “PresLev” – уровень давления, мбар, “Tr,K” – значение температуры воздуха на этом уровне в К, “Tr,C” – значение температуры воздуха на этом уровне в С°, “LevH” – высота уровня, “FT,h” и “FN,h” – не используются.

Нахождение среднemasсовой температуры для каждого профиля проводилось в несколько этапов. Сначала было рассчитано давление на высоте ЭК НЕВОД – 173 м над уровнем моря. Две соседние точки профиля соединялись прямой линией  $P = A \times H + B$ , рассчитывались коэффициенты прямой  $A$  и  $B$  и с их помощью находилось искомое давление – считаем, что оно соответствует одной атмосфере над установкой.

Далее исходные данные давления делятся на найденное значение – получим точ-

ки, которые назовем относительным давлением в атмосферах. Далее построим ряд из значений относительного давления от 0.05 до 1.00 с шагом 0.05. Таким образом мы разобьем атмосферу на слои, в каждом из которых давление меняется на одну и ту же величину.

Далее в пределах каждого интервала между двумя соседними относительными давлениями будем использовать линейную зависимость температуры от относительного давления. Отбираем исходные интервалы, в которые попадают значения из ряда. Для каждого такого интервала находим коэффициенты линейной зависимости и для каждого значения из ряда рассчитываем температуру.

Построим график 2.5, на котором отобразим экспериментальные данные давления и температуры и рассчитанные значения, чтобы проверить правильность расчета

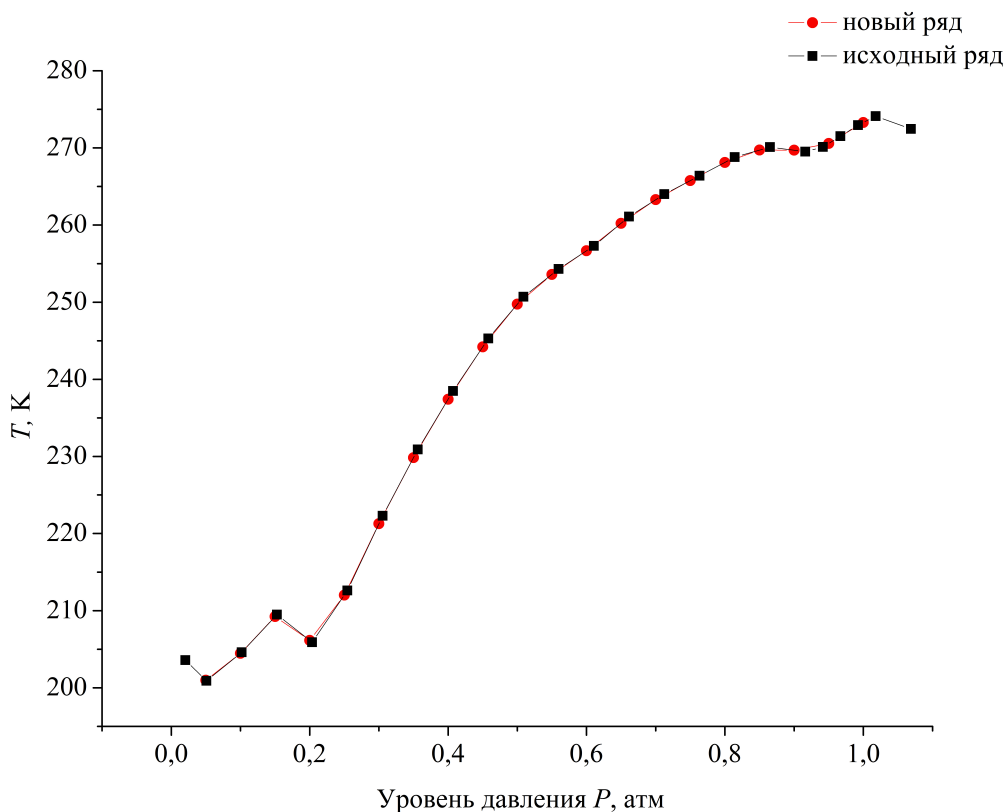


Рисунок 2.5 — Проверка расчета температуры в новых точках

Вычисление среднемассовой температуры  $\langle T \rangle$  было проведено по формуле:

$$\langle T \rangle = \frac{\sum_{k=0}^{19} \frac{T_k + T_{k+1}}{2} \times 0.05}{\sum_{k=0}^{19} 0.05}, \quad (2.1)$$

где k – порядковый номер интервала,  $T_k$  – новая рассчитанная температура, 0.05 –

толщина слоя атмосферы. Изменение скорости счета от температуры представлена на графике 2.6

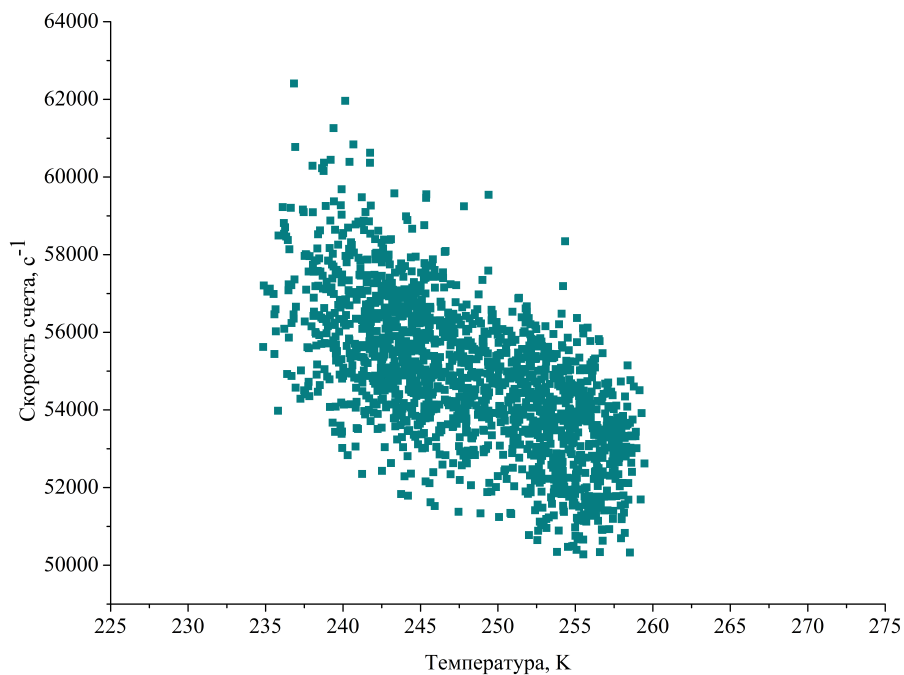


Рисунок 2.6 — Зависимость скорости счета от среднемассовой температуры атмосферы

На графике 2.7 показано, как со временем изменяются скорость счета и температура.

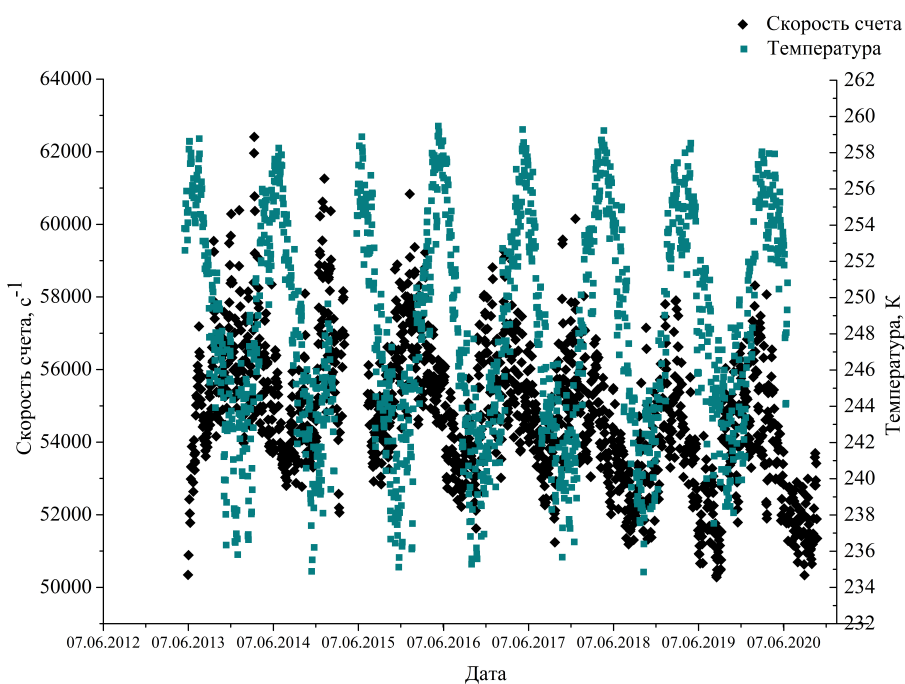


Рисунок 2.7 — Временные ряды скорости счета триггера и среднемассовой температуры

Период измерения температуры, равный трем часам, превышает длительность нескольких наборов, что приводит к ошибкам: среднемассовая температура в этих случаях равна нулю. На данном этапе соответствующие точки были удалены, в дальнейшем значения планируется рассчитать с помощью интерполяции.

# 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.
- Написана программа для расчета среднего значения атмосферного давления и среднemasсовой температуры для каждого набора.
- Построены зависимости скорости счета от давления и температуры.

В дальнейшем планируется рассмотреть скорости счета отдельных триггеров ДЕКОР, соответствующих регистрации мюонов, и реализовать введение поправок на атмосферные эффекты.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *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.
2. Уникальная научная установка «Экспериментальный комплекс НЕВОД». — 2020. — Дата обращения 21.12.2020. <http://ununevod.mephi.ru/ru/>.
3. *В.В.Борог*. Основы мюонной диагностики: Учебное пособие. — М.: МИФИ, 2008.
4. *В.В.Подбельский*. Язык C++. — М.: Финансы и статистика, 2001.