

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”»

Научно-образовательный центр НЕВОД

ОТЧЕТ

о прохождении производственной практики
(научно-исследовательской работы)

«ПОИСК И АНАЛИЗ СОВМЕСТНЫХ СОБЫТИЙ НА УСТАНОВКАХ
ДЕКОР И НЕВОД-ШАЛ»

Студент: Альхимович М.Д.

Группа: Б21-104

Научный руководитель: Богданов А.Г.

г. Москва
2024

АННОТАЦИЯ

Научно-исследовательская работа посвящена восстановлению направлений прихода широких атмосферных ливней, зарегистрированных установкой НЕВОД-ШАЛ. В рамках исследования были реализованы кластерный и классический подходы. Разработаны программные скрипты для численного расчета зенитных и азимутальных углов, которые использовались для обработки и анализа моделированных событий с откликами установки НЕВОД-ШАЛ на прохождение частиц ШАЛ через детекторы установки.

Результаты работы представлены в виде распределений событий по пространственным углам между направлениями прихода ШАЛ, заданными в модели и реконструированными с использованием классического и кластерного подходов для ливней от первичных протонов с фиксированной энергией 10^{16} эВ и 10^{17} эВ и фиксированными зенитными углами 10, 20, 30, 40 и 50.

ABSTRACT

This scientific research work is dedicated to reconstructing the directions of arrival of extensive air showers (EAS) detected by the NEVOD-EAS installation. Within the framework of the study, both cluster and classical approaches were implemented. Program scripts were developed for the numerical calculation of the zenith and azimuthal angles, which were used to process and analyze simulated events with the responses of the NEVOD-EAS installation to the passage of EAS particles through the detectors.

The results of the work are presented in the form of event distributions over spatial angles between the EAS arrival directions specified in the model and reconstructed using the classical and cluster approaches for showers from primary protons with fixed energies of 10^{16} eV and 10^{17} eV and fixed zenith angles of 10, 20, 30, 40 and 50.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
УСТАНОВКА НЕВОД-ДЕКОР	6
УСТАНОВКА НЕВОД-ШАЛ	8
СИСТЕМА ГЛОБАЛЬНОЙ ВРЕМЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ (СГВС)	10
СОБЫТИЯ С ГРУППАМИ МЮОНОВ В ДЕТЕКТОРЕ ДЕКОР	11
СОВМЕСТНЫЕ СОБЫТИЯ НА УСТАНОВКАХ ДЕКОР И НЕВОД-ШАЛ	13
НАПРАВЛЕНИЕ ПРИХОДА ШАЛ	16

ВВЕДЕНИЕ

В области энергий выше 10^{15} эВ интенсивность потока первичных космических лучей (ПКЛ) довольно мала, что делает затруднительным проведение прямых измерений их энергии и массового состава с помощью детекторов, размещенных на космических аппаратах или аэростатах. Поэтому единственным источником информации о свойствах первичных космических лучей в данной энергетической области на сегодняшний день являются широкие атмосферные ливни (ШАЛ), которые представляют собой ядерно-электромагнитные каскады, инициированные при взаимодействии первичных частиц с ядрами атомов воздуха. Уникальная научная установка «Экспериментальный комплекс НЕВОД» (ЭК НЕВОД), расположенная на территории НИЯУ МИФИ, позволяет проводить фундаментальные и прикладные исследования с использованием природных потоков частиц на поверхности Земли.

Одной из наиболее интересных задач ЭК НЕВОД является изучение групп мюонов, представляющих собой одновременное (в пределах десятков наносекунд) прохождение через установку проникающих частиц с практически параллельными треками, с помощью прецизионного трекового детектора ДЕКОР (проводится с 2002 г.) [1,2] и черенковского водного калориметра НЕВОД (с 2013 г.) [3]. Исследование мюонной компоненты ШАЛ в целом дает возможность получать информацию о массовом составе ПКЛ и проверять модели адронных взаимодействий при сверхвысоких энергиях. Функционирование в составе ЭК НЕВОД установки НЕВОД-ШАЛ поможет осуществить привязку событий с группами мюонов к традиционным методам регистрации ШАЛ, где определяется положение оси, мощность ливня, направление, и изучить, например, пространственное распределение мюонов.

УСТАНОВКА НЕВОД-ДЕКОР

Координатно-трековый детектор ДЕКОР [4] представляет собой крупномасштабную установку, специально предназначенную для изучения мюонов космического излучения на поверхности Земли в широком диапазоне зенитных углов вплоть до горизонта. Установка состоит из 8 сборок-супермодулей (СМ00 – СМ07) по 8 слоев пластиковых камер из стримерных трубок, общая площадь 70 м^2 , 32768 каналов регистрации. По данным детектора ДЕКОР можно найти количество треков в группе мюонов и определить ее направление. Точность локализации трека в одном СМ лучше 1 см, а точность оценки направления – лучше 1° . Супермодули детектора ДЕКОР расположены в галереях здания с трех сторон от черенковского водного детектора (ЧВД) НЕВОД объемом 2000 м^3 .

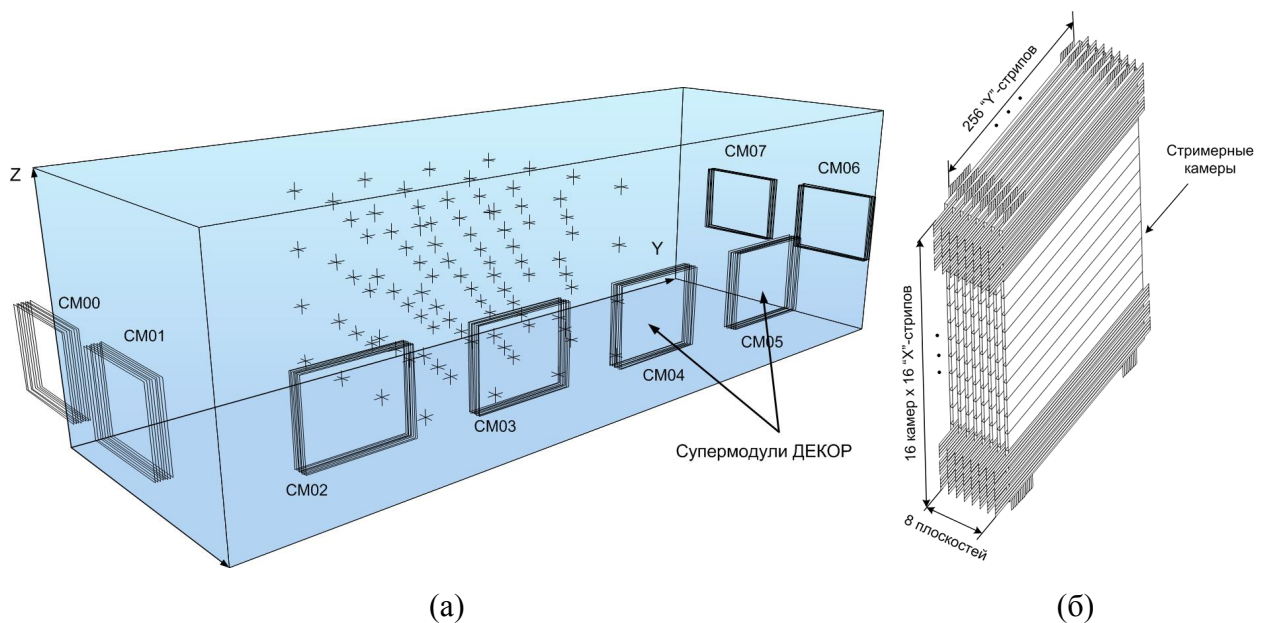


Рисунок 1 — Общая схема установки НЕВОД-ДЕКОР (а) и структура супермодуля детектора ДЕКОР (б).

НЕВОД [5] предназначен для изучения всех основных компонент космических лучей на поверхности Земли и состоит из 91 квазисферического измерительного модуля (КСМ), которые расположены в узлах пространственной решетки. Фактически решетка сформирована из 25 вертикальных гирлянд по 3 или 4 КСМ. Каждый КСМ состоит из 6 фотоумножителей с плоским фотокатодом, ориентированных вдоль осей ортогональной системы

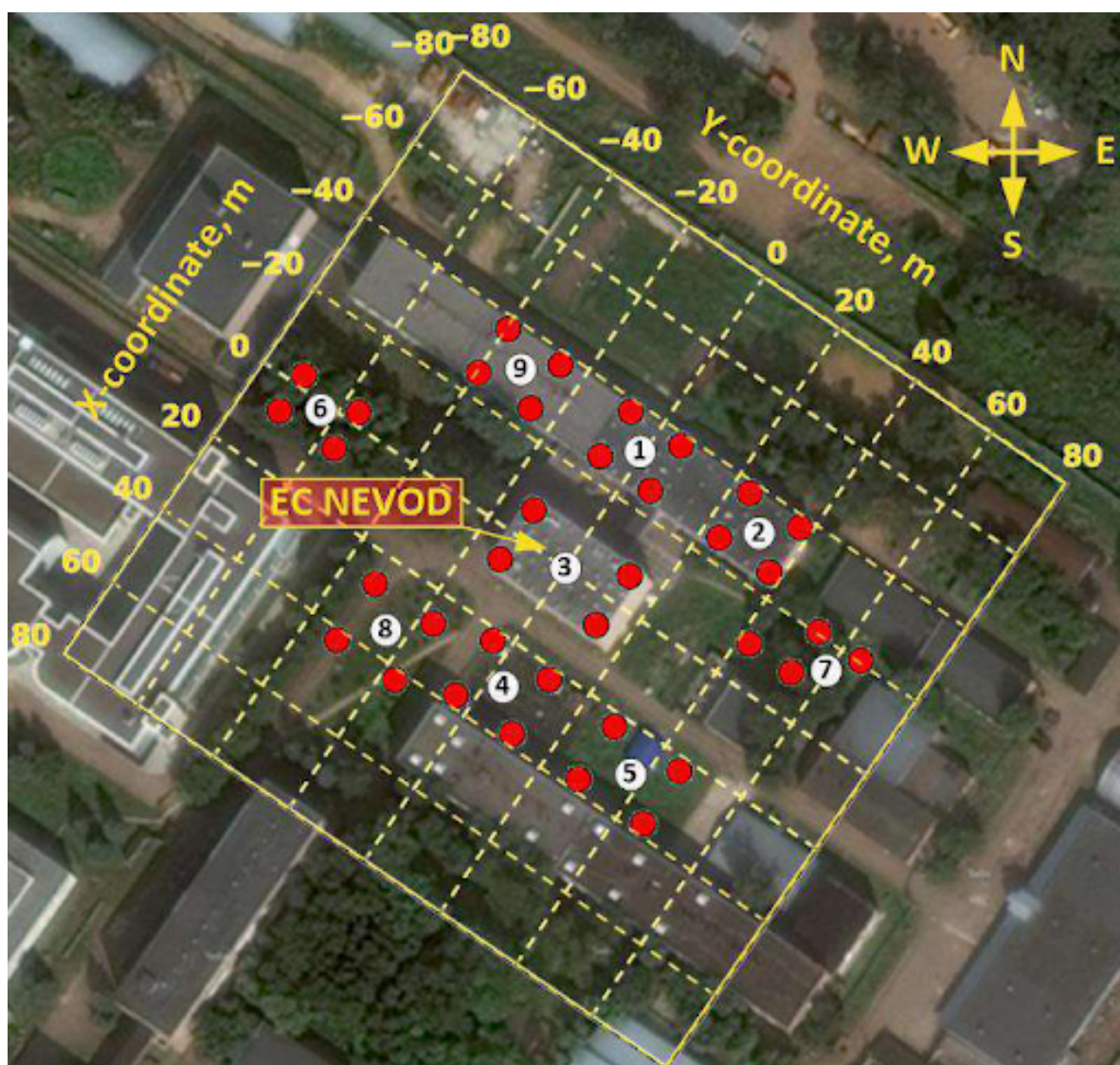
координат. Такая конструкция обеспечивает практически одинаковую эффективность регистрации черенковского излучения, приходящего с любого направления. Широкий динамический диапазон измерений каждого ФЭУ (от 1 до 10^5 фотоэлектронов) позволяет проводить калориметрические исследования, в частности, измерять энергосодержания групп мюонов. На рис. 1 изображена схема установки НЕВОД-ДЕКОР (а) и структура супермодуля детектора ДЕКОР (б).

УСТАНОВКА НЕВОД-ШАЛ

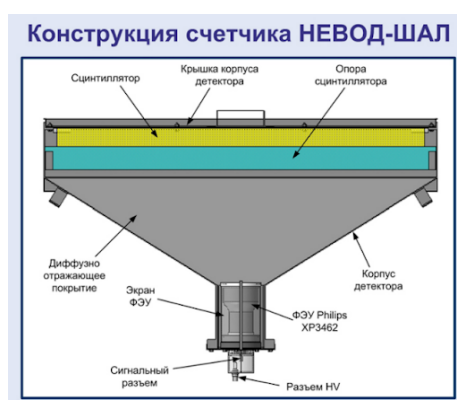
Установка НЕВОД-ШАЛ [6] предназначена для регистрации преимущественно электронно-фотонной компоненты широких атмосферных ливней в энергетическом диапазоне от 10^{15} до 10^{17} эВ. Её детектирующие элементы размещаются на крышах корпусов университета и на поверхности Земли (перепад высот достигает 20 м) на площади около 10^4 м². Разновысотность расположения детектирующих элементов НЕВОД-ШАЛ определяет кластерную организацию ее регистрирующей системы. В состав установки НЕВОД-ШАЛ входит 9 кластеров по 4 детектирующие станции (ДС), расстояние между центрами соседних кластеров составляет около 30 м. Каждая станция состоит из 4 пластиковых сцинтилляционных счетчиков площадью 0.8×0.8 м² и толщиной 4 см, просматриваемых ФЭУ. При этом три счетчика оснащены одним фотоумножителем, а четвертый оборудован еще и дополнительным ФЭУ – для расширения динамического диапазона измерений до 10^5 частиц.

Каждый кластер оснащен своим локальным пунктом, который независимо осуществляет сбор и оцифровку аналоговых сигналов с детектирующих элементов, отбор событий по триггерным условиям, присваивание событиям временной метки и, таким образом, является самостоятельной ливневой установкой, способной определять как число частиц, зарегистрированных каждым детектирующим элементом, так и направление прихода фронта широких атмосферных ливней.

На рисунке 2 изображена схема расположения кластеров установки НЕВОД-ШАЛ на территории НИЯУ МИФИ, а также конструкция счетчика и детектирующая станция.



(а)



(б)



(в)

Рисунок 2 — Схема расположения кластеров установки НЕВОД-ШАЛ вокруг ЭК НЕВОД (а), конструкция счетчика (б) и детектирующая станция (а).

СИСТЕМА ГЛОБАЛЬНОЙ ВРЕМЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ (СГВС)

Для обеспечения синхронной работы кластеров установки, а также привязки регистрируемых событий к мировому времени используется система глобальной временной синхронизации (СГВС) [7]. В состав СГВС входят: модуль глобальной временной синхронизации (МГВС), антенна GPS/ГЛОНАСС и управляющая ЭВМ.

Основными функциями модуля МГВС являются:

- раздача единой тактовой частоты 100 МГц в синхронизируемые устройства;
- раздача временных меток в синхронизируемые устройства для синхронного запуска их локальных часов;
- независимая синхронизация любого из каналов;
- синхронизация локальных часов реального времени с внешним приемником GPS;
- передача по сети Ethernet времени локальных часов и GPS-приемника.

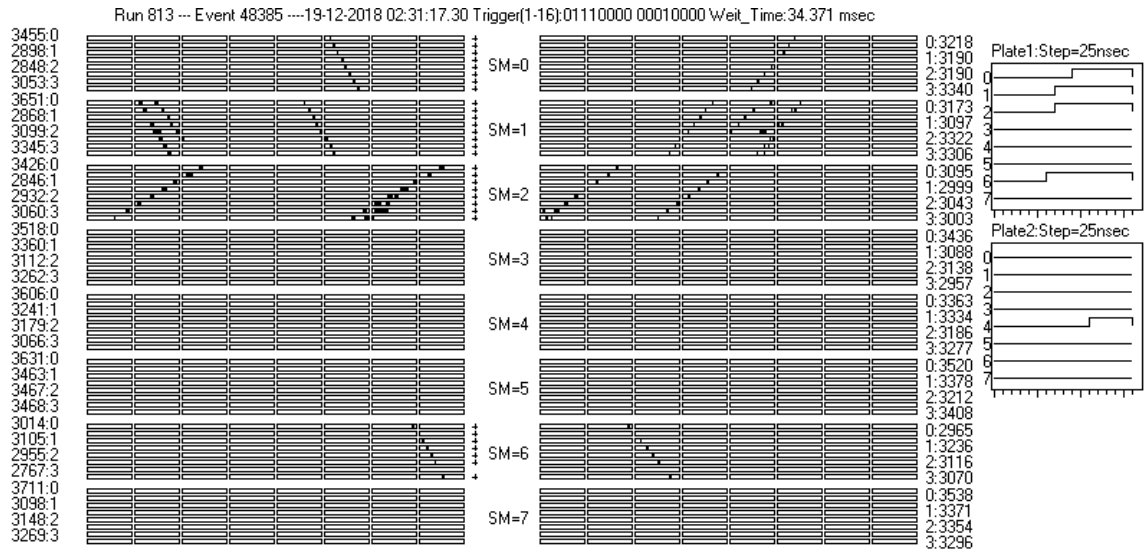
Точность синхронизации локальных часов кластеров установки составляет 10 нс (1 период тактового генератора, установленного в модуле МГВС). Система СГВС применяется и для синхронизации локальных часов триггерной системы НЕВОД-ДЕКОР, работающей на собственной тактовой частоте 40 МГц. Для этого с выхода МГВС передается только временная метка. Точность синхронизации между НЕВОД-ШАЛ и НЕВОД-ДЕКОР при этом составляет около 25 нс.

СОБЫТИЯ С ГРУППАМИ МЮОНОВ В ДЕТЕКТОРЕ ДЕКОР

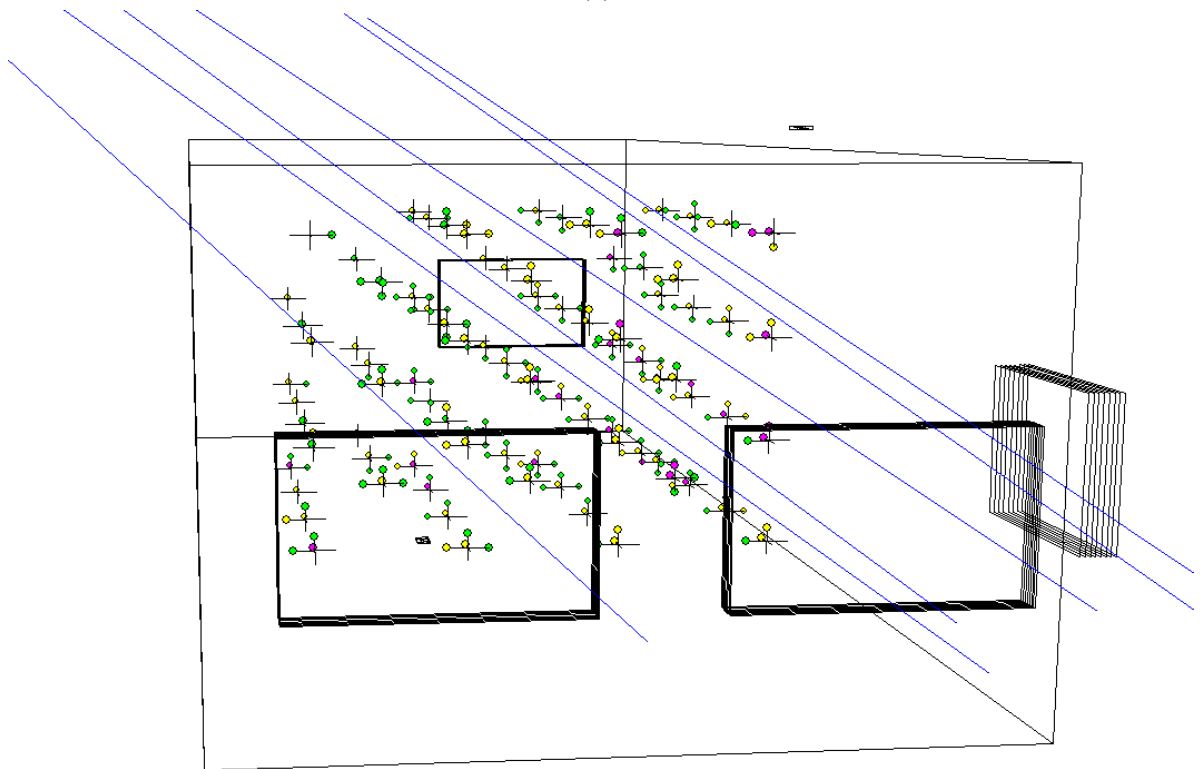
Стандартный отбор и анализ групп мюонов по данным детектора ДЕКОР проводится для множественностей мюонов в группе $m \geq 5$ и зенитных углов $\theta \geq 55^\circ$, чтобы исключить возможное влияние электронно-фотонной и адронной компонент ШАЛ на реконструкцию треков. Однако из части экспериментального материала в интервале зенитных углов $40^\circ \leq \theta < 55^\circ$ (вследствие резкого увеличения статистики с уменьшением зенитного угла) операторами ЭК НЕВОД было отобрано 30 375 групп с множественностью мюонов $m \leq 5$ (за 6 324 ч) и 4 139 групп с множественностью $m = 4$ (за 1 043 ч). В этом случае установка НЕВОД-ШАЛ в принципе еще должна быть способна регистрировать электронно-фотонную компоненту ШАЛ, что позволяет провести анализ указанных событий совместно как минимум по двум компонентам ШАЛ. Отметим также, что события с группами мюонов отбирались в двух 60° секторах азимутальных углов, где шесть из восьми СМ детектора ДЕКОР экранированы водным объемом детектора НЕВОД, причем во внимание принимаются данные только этих шести СМ. Пороговая энергия мюонов при этом составляет около 2 ГэВ.

Отбор событий с умеренными зенитными углами проводился по 12-й серии измерений из наборов данных (RUN) 622-688 (с 15.02.18 по 29.05.18 г.) и 810-841 (с 13.12.18 по 03.02.19 г.). На рис. 3 изображен пример события с группой мюонов, зарегистрированного установкой ДЕКОР (а) и пространственной реконструкции треков (б).

19-12-2018 02:31:11.450.535.208, RUN = 813, Event = 48385,
 $m = 5$, $\theta = 59.2^\circ$, $\phi = 120.7^\circ$



(a)



(б)

Рисунок 3 — пример события с группой мюонов, зарегистрированного установкой ДЕКОР (а) и пространственной реконструкции треков (б).

СОВМЕСТНЫЕ СОБЫТИЯ НА УСТАНОВКАХ ДЕКОР И НЕВОД-ШАЛ

Были отобраны события, зарегистрированные на установках ДЕКОР и НЕВОД-ШАЛ за период с 19.12.2018 по 02.02.2019, в пределах временного интервала $|\Delta t| = |t_{\text{Д}} - t_{\text{НШ}}| < 1000$ нс, где

- $t_{\text{Д}}$ время регистрации события ДЕКОР,
- $t_{\text{НШ}}$ время регистрации события НЕВОД-ШАЛ.

Было найдено 5214 события. Создана база данных MongoDB найденных совместных событий установок. Среднее значение временного интервала составило $\mu_t = 336.8$ нс, а среднее отклонение $\sigma = 52.8$ нс. На рисунке 4 представлено распределение совместных событий по Δt .

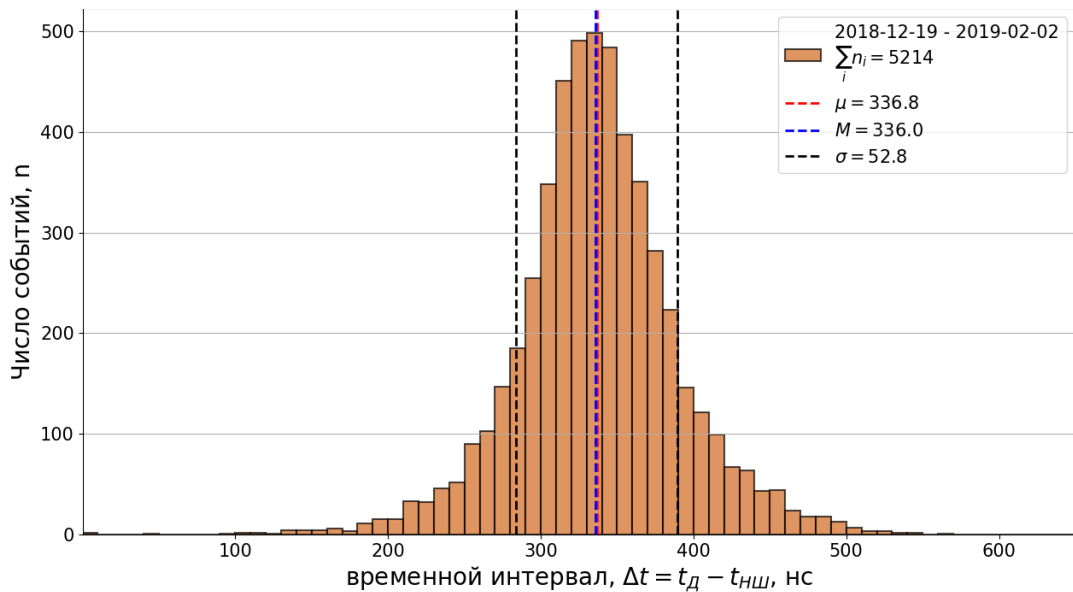


Рисунок 4 — распределение числа совместных событий по временному интервалу между ДЕКОР и НЕВОД-ШАЛ

Были определены совместные события с группами мюонов $m > 5$. Распределение числа событий групп мюонов по номеру RUN и его длительности изображено на рисунке 5.

Можно отметить, что примерно для 20% событий групп мюонов не было найдено совместных событий на установке НЕВОД-ШАЛ. Для определения причин данного явления был проведен первичный анализ не найденных событий.

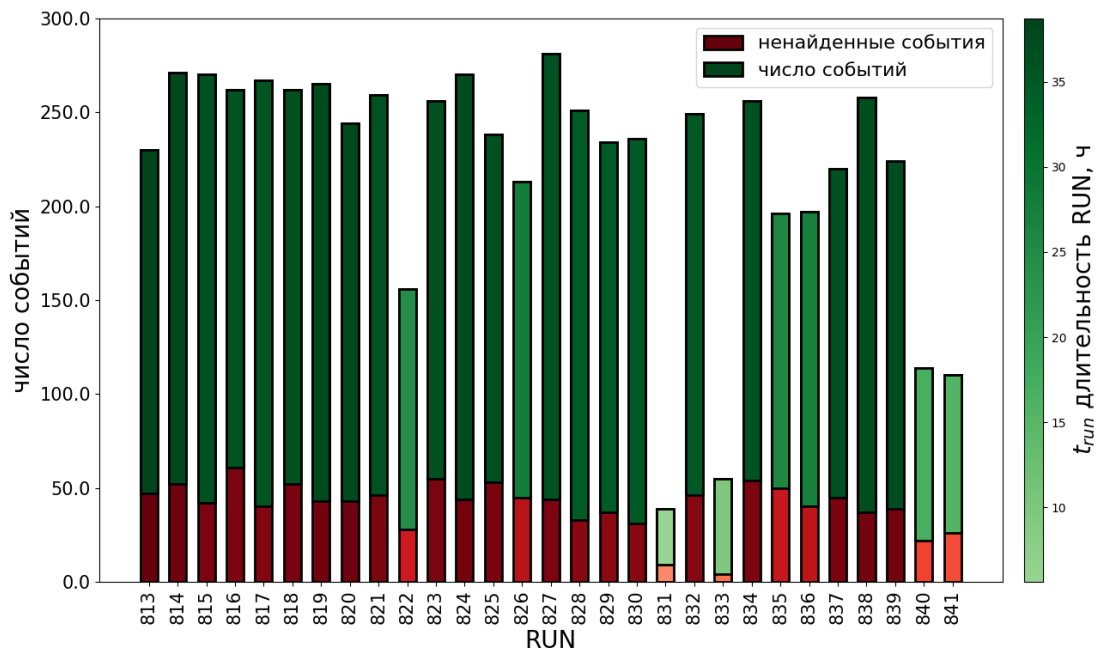
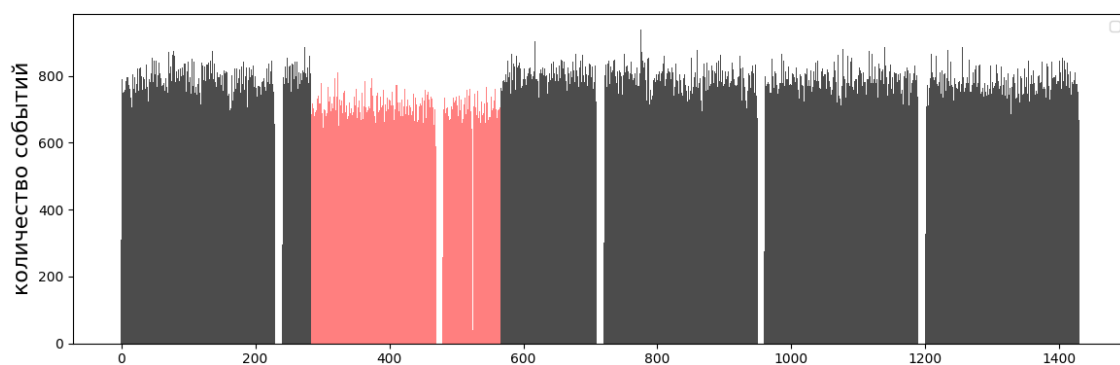


Рисунок 5 — распределение числа событий групп мюонов по RUN

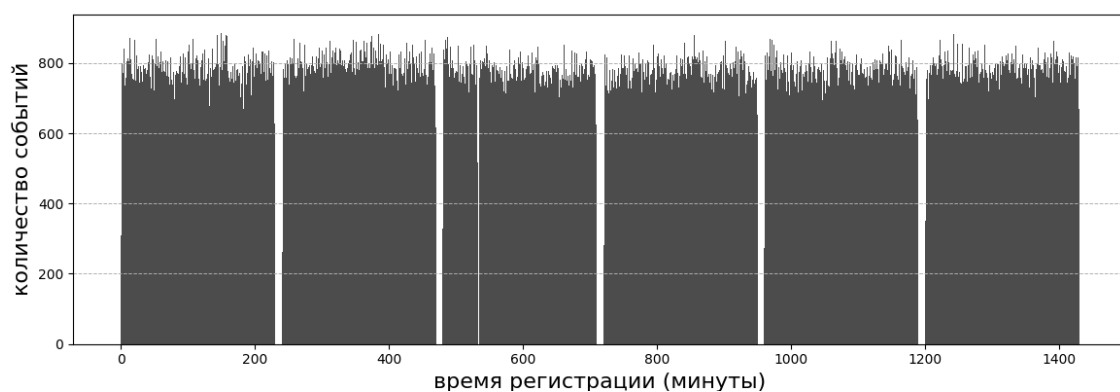
Установка НЕВОД-ШАЛ может работать как в режиме экспозиции, так и мониторинга. Интервалы работы установки в режиме экспозиции разбиваются на временные отрезки длительностью 10 минут, в ходе которых не происходит срабатываний детектирующих станций. На рисунке 6 представлен темп счета регистрации событий на установке НЕВОД-ШАЛ за 19.12.2018 (а) и 20.12.2018 (б). Видно, что 20.12.2018 (б) установка имеет стабильный в течение всего дня темпы счета, когда за 19.12.2018 (а) имеется резкий спад, что может быть вызвано с временными техническими неисправностями некоторых детектирующих станций.

Учитывая выше описанные особенности работы установки НЕВОД-ШАЛ, было построено распределение зенитного угла θ направлений прихода событий для групп мюонов с отсутствующими совместными событиями на установке НЕВОД-ШАЛ за 19.12.2018 и 20.12.2018 числа (рисунок 7).

Из-за меньшей проникающей способности электронно-фотонной компоненты, часть отсутствующих совместных событий установки НЕВОД-ШАЛ можно списать на высокие зенитные углы. Остальные группы мюонов с не найденными событиями подлежат более детальному анализу, как вариант поиска совместных событий с другими установками ЭК НЕВОД, например с черенковским водным калориметром.



(а)



(б)

Рисунок 6 — Темп счета событий НЕВОД-ШАЛ за 19.12.2018 (а) и 20.12.2018 (б)

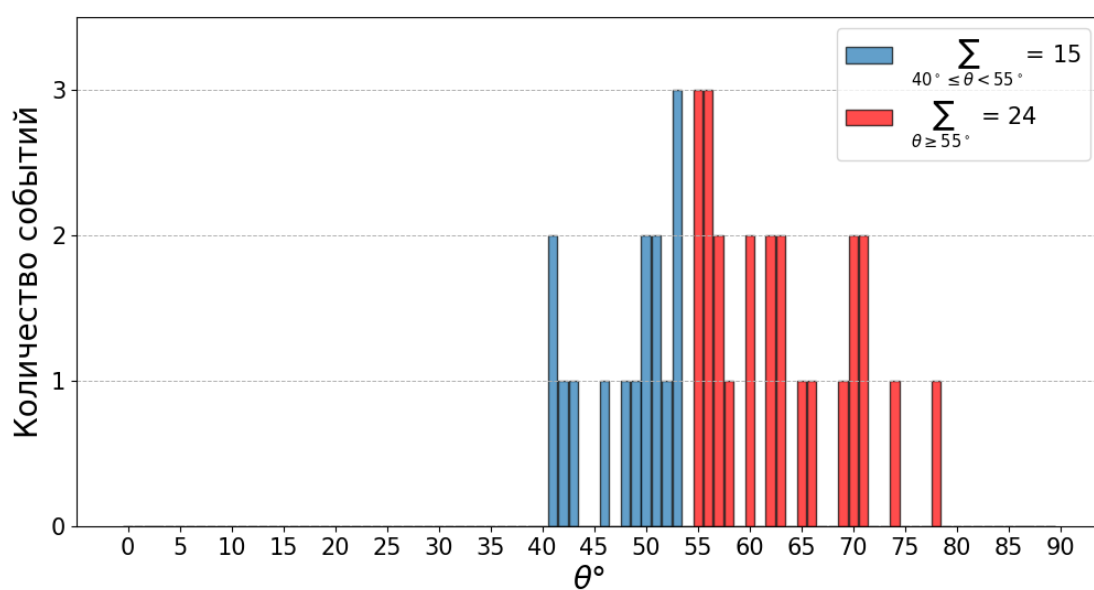


Рисунок 7 — распределение значений зенитного угла θ событий групп мюонов

НАПРАВЛЕНИЕ ПРИХОДА ШАЛ

Были построены распределения разницы углов направления прихода ШАЛ совместных событий на установках ДЕКОР и НЕВОД-ШАЛ. На рисунке 8 представлено распределение $\Delta\theta = \theta_{\text{д}} - \theta_{\text{нш}}$ (а) и распределение $\Delta\phi = \phi_{\text{д}} - \phi_{\text{нш}}$ (б) по числу событий, где

- $\theta_{\text{д}}, \phi_{\text{д}}$ зенитный и азимутальный углы направления прихода события на установке ДЕКОР,
- $\theta_{\text{нш}}, \phi_{\text{нш}}$ соответственно на НЕВОД-ШАЛ.

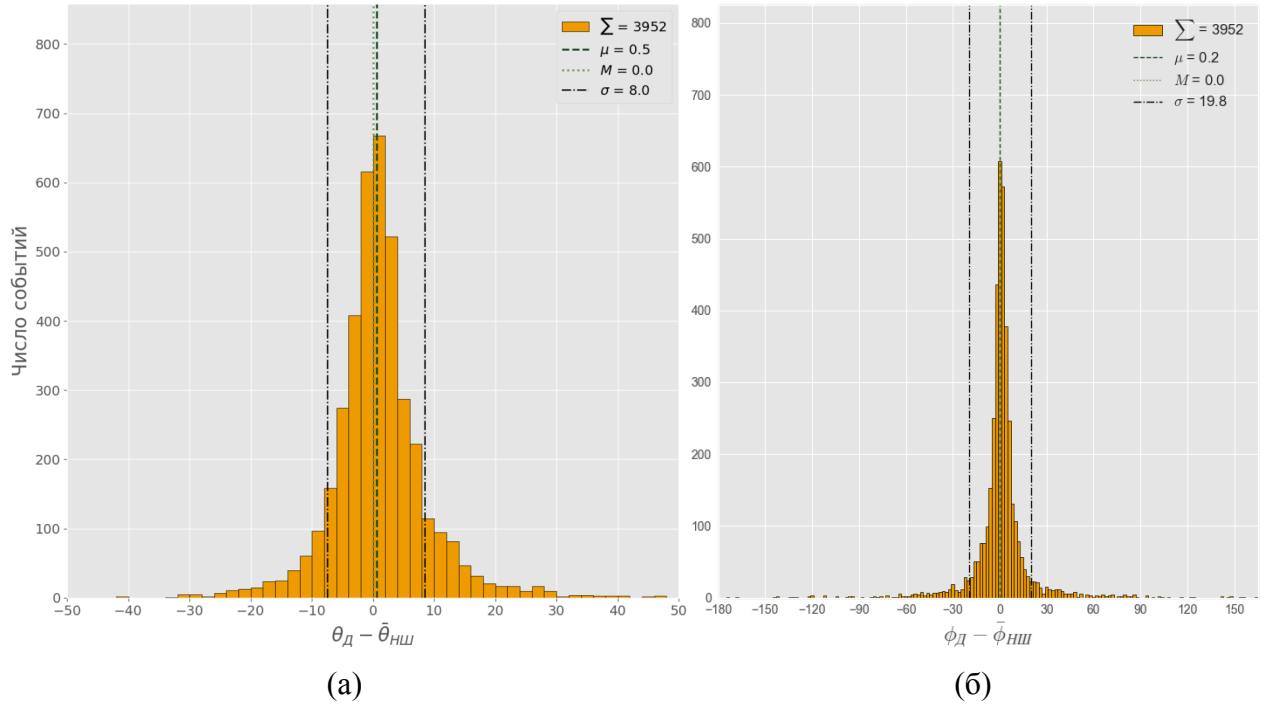


Рисунок 8 — распределение разности углов направления прихода событий ДЕКОР и НЕВОД, зенитный угол (а), азимутальный угол (б).

Считая, распределения нормальными можно полагать, что в пределах интервала $\sigma_{\theta} = 8^{\circ}$ ($-\sigma_{\theta}, +\sigma_{\theta}$) (где σ_{θ} — стандартное отклонение) у 68% событий зенитный угол θ различается незначительно. Азимутальные углы имеют большее стандартное отклонение $\sigma_{\phi} = 20^{\circ}$, что объясняется кратно большими значениями самих углов и более широким диапазоном возможных значений.

Большие выбросы на хвостах распределений объясняются низким числом сработавших кластеров НЕВОД-ШАЛ. На рисунке 9 представлено

распределение угла между векторами направлений прихода событий ДЕКОР и НЕВОД-ШАЛ $\angle(\mathbf{n}_Д, \mathbf{n}_{НШ})$

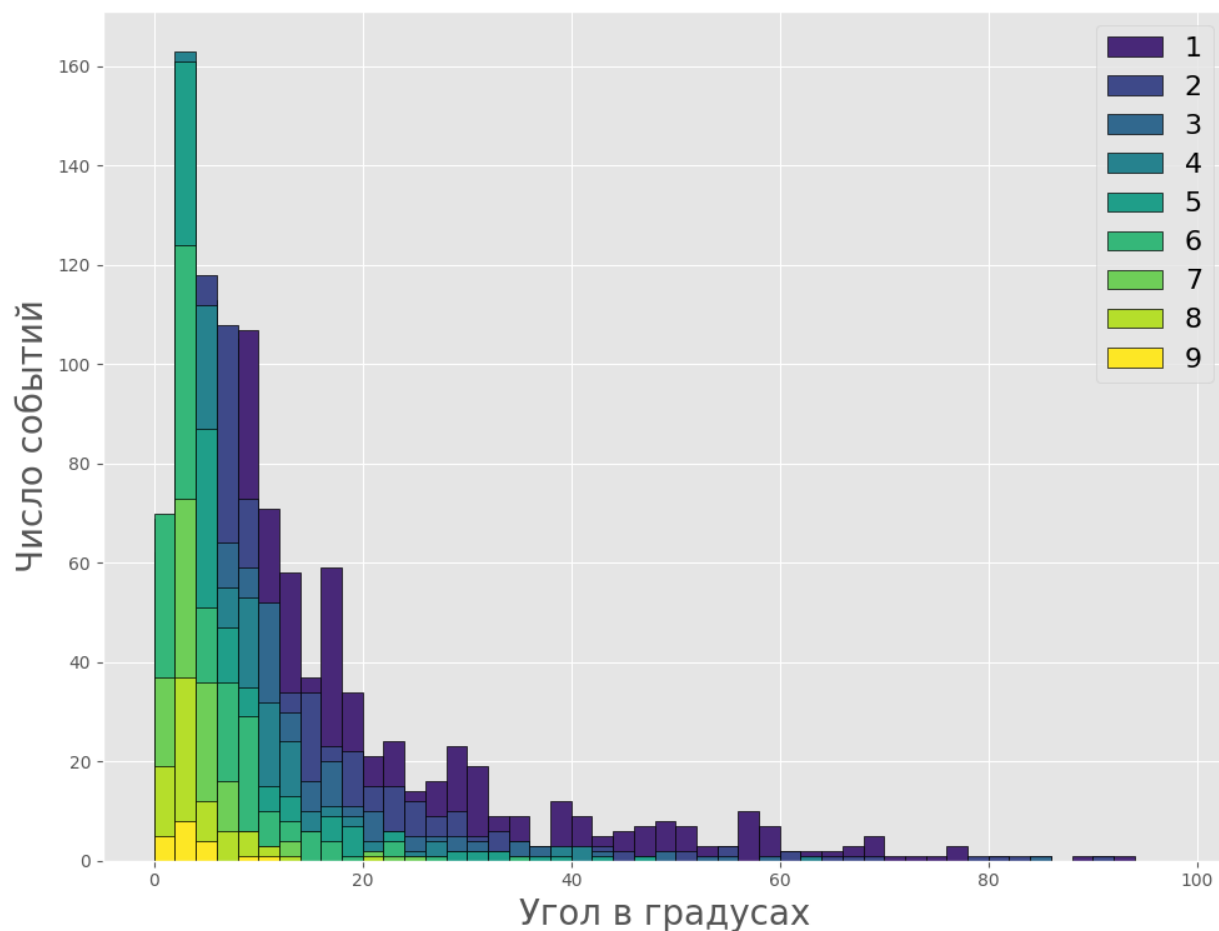


Рисунок 9 — распределение угла между векторами направлений прихода событий ДЕКОР и НЕВОД-ШАЛ

Из распределения видно, что определение направления прихода события на НЕВОД-ШАЛ сходится к направлению на ДЕКОР при росте числа сработавших кластеров ! добавить число мюонов