Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

Национальный исследовательский ядерный университет «МИ Φ И»

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Моделирование и анализ распределения частиц в широких атмосферных ливнях

Научный руководитель

_____ С. С. Хохлов

Научный консультант

Студент

_____ Е. А. Южакова

_____ К. А. Воробьёва

Содержание

1	Цели и задачи	2
2	Теоритические сведения 2.1 Космические лучи и ШАЛ	2 2 3
3	Обработка данных 3.1 Данные для анализа	4 4 5
4	Результаты 4.1 Мощность широких атмосферных ливней	5 5 6 7
5	Эксперимент "Адрон"	8
6	Заключение	10
Ст	писок литературы	10

1 Цели и задачи

Цель работы

Изучение основных параметров широких атмосферных ливней (ШАЛ). Построение энергетических спектров на основе смоделированных данных в программе CORSIKA и их сравнение с экспериментальными данными. Полученные результаты должны послужить основой для дальнейшей работы с данными установки «Адрон» на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции (ТШВНС).

Задачи работы

Изучить теоретические основы формирования и развития широких атмосферных ливней.

Построить энергетические спектры первичных космических лучей на основе данных моделирования.

Сравнить полученные результаты с экспериментальными данными для проверки адекватности моделирования.

Освоить методы обработки данных ШАЛ, которые будут использоваться в дальнейшей работе с экспериментальными данными установки «Адрон»

2 Теоритические сведения

2.1 Космические лучи и ШАЛ

Космические лучи- это быстрые заряженные частицы космического происхождения. Протоны составляют около 90 % от всех первичных космических лучей, на долю ядер гелия приходится приблизительно 10 % потока и, наконец, поток всех остальных ядер составляет только порядка 1 % от полного потока [1]. В истории исследования космических лучей (КЛ), которая насчитывает почти 100 лет, важным событием стало открытие явления, связанного с их взаимодействием с земной атмосферой. Когда частицы КЛ, путешествуя по космосу, вступают в атмосферу, они взаимодействуют с атомами воздуха. Современные представления о процессе этого взаимодействия следующие: изза ядерных и электромагнитных взаимодействий в верхних слоях атмосферы начинается лавинообразное развитие потока вторичных частиц, в основном электронов и мюонов, а также электромагнитного излучения, связанного с этим процессом. Такие потоки, которые называют широкими атмосферными ливнями (ШАЛ), достигают значительных размеров в глубине атмосферы. Например, частицы с энергией выше 10¹⁸ эВ создают ливни, в которых вблизи поверхности Земли содержится более 10⁹ заряженных частии. падающих практически одновременно на несколько квадратных километров. Ливень выглядит как плоский и тонкий диск, состоящий из частиц, движущихся через атмосферу с почти световой скоростью. Плоскость диска перпендикулярна направлению движения частицы, вызвавшей данный ливень, а траектория его центра продолжает это направление. В случае вертикальных ШАЛ все частицы ливня достигают поверхности Земли одновременно. Это стало важным условием для регистрации частиц, принадлежащих одному ливневому событию, и открыло явление ШАЛ в космических лучах. Для этого нужно было разнести счетчики частиц и настроить их на совпадение. Подобные эксперименты впервые в 1938 году провел французский ученый Пьер Оже, и вначале эти ливни назывались "ливнями Оже". Это открытие стало возможным благодаря пионерским работам в исследовании КЛ, выполненным в Италии группой Б.Росси и в России под руководством Д.В.Скобельцына в 20-е и 30-е годы прошлого века[2].

2.2 Основные параметры ШАЛ

Основными характеристиками широкого атмосферного ливня являются зенитный и азимутальный углы падения первичной частицы θ и ϕ , координаты пересечения оси ливня с плоскостью наблюдения (x, y), энергия первичной частицы E_0 , мощность ливня N, а также возраст ливня s. Зенитный угол θ определяет наклон траектории падения частицы относительно вертикали, а азимутальный угол ϕ указывает её направление в горизонтальной плоскости. Ось ливня определяется как продолжение вектора импульса первичной частицы в направлении распространения каскада. Её пересечение с уровнем наблюдения реконструируется по пространственному распределению плотности частиц, регистрируемых установками.

Энергия первичной частицы E_0 играет ключевую роль в развитии ливня — с её увеличением возрастает число вторичных частиц, а сам ливень проникает глубже в атмосферу. Мощность ливня N представляет собой общее число частиц на определённой стадии формирования каскада, преимущественно заряженных, поскольку гамма-кванты и нейтрино либо слабо, либо вовсе не регистрируются обычными детекторами. Часто в качестве оценки мощности используют число электронов N_e , составляющих основную долю заряженных частиц в хорошо развитом ливне. Мощность ливня зависит от энергии первичной частицы E_0 , высоты первого взаимодействия h_1 , а также углов падения θ и ϕ . Возраст ливня s — это безразмерный параметр, отражающий стадию развития каскада. Значения s < 1 соответствуют молодым ливням, которые ещё не достигли максимума. При s = 1 ливень находится в стадии максимального развития, а при s > 1 — начинает затухать. Ещё одним важным параметром является глубина максимального развития X_{max} , измеряемая в [г/см²], которая указывает глубину атмосферы, на которой достигается наибольшее число частиц. Чем выше энергия первичной частицы, тем глубже развивается ливень, и тем меньше значение X_{max} . Связанной величиной является высота максимального развития h_{max} , выражаемая в [см], [м] или [км] от уровня моря. Она определяется через атмосферную глубину X по барометрической формуле для стандартной изотермической экспоненциальной атмосферы:

$$X(h) = X(h=0)exp^{h/h_s}$$
(1)

где h_s — масштабная высота атмосферы. Таким образом, характеристики ШАЛ тесно связаны между собой и зависят от параметров первичной частицы и условий её взаимодействия с атмосферой.[3]

3 Обработка данных

3.1 Данные для анализа

В настоящей работе для анализа широких атмосферных ливней использовались данные, полученные методом численного моделирования с использованием программного пакета CORSIKA (COsmic Ray SImulation for KAscade)[4], в конфигурации с моделями адронных взаимодействий QGSJET-II-04 и FLUKA 2020.0.3. Моделирование проводилось для первичных протонов в диапазоне энергий от 10^{14} до 10^{17} эВ. Энергетический спектр первичных частиц задавался степенной функцией с показателем ($\gamma + 1$) = 2.7, что соответствует наблюдаемому спектру космических лучей. Всего было смоделировано 3 миллиона событий.

Распределение по зенитным углам охватывало диапазон от 0° до 50° и осуществлялось равномерно по $\cos \theta$. Азимутальные углы ϕ разыгрывались равномерно в интервале от 0° до 360°.

Для повышения точности моделирования и исключения низкоэнергетического фона учитывались только те вторичные частицы, энергии которых превышали установленные пороговые значения: для адронов и мюонов — свыше 100 МэВ, для гамма-квантов и электронов — свыше 1 МэВ. Эти условия соответствуют техническим возможностям современных детекторных систем и позволяют более корректно сопоставлять моделируемые данные с результатами реальных экспериментов.

3.2 Методика обработки данных и построения спектров

Для обработки результатов моделирования и построения спектров была разработана программа на языке Python, предназначенная для выборки и обработки параметров широких атмосферных ливней из выходных файлов, сгенерированных в ходе расчётов CORSIKA. Программа осуществляла фильтрацию данных, группировку событий по интервалам (диапазоны углов) и подсчёт числа ливней в каждом диапазоне.

Построение графиков и дальнейший анализ спектров проводились с использованием программного пакета Origin, который обеспечил удобную визуализацию зависимостей.

4 Результаты

4.1 Мощность широких атмосферных ливней

Для анализа характеристик широких атмосферных ливней в работе были построены спектры мощности в логарифмической шкале. На рис.1 рис.2 приведены примеры мощностей ШАЛ, параметры которых получены при моделировании в программе CORSIKA. На рис.1 представлен исходный (недомноженный) спектр мощности ливня. Видна характерная форма распределения с максимумом в районе $lgN_e = 4$, за которым следует убывание числа событий. На рис.2 показан спектр, домноженный на $N_e^{1,5}$. Домножение спектра на $N_e^{1,5}$ представляет собой приём визуализации, который позволяет выравнивать крутой наклон распределения в логарифмическом масштабе. Это делает спектр более пологим и способствует выявлению структурных особенностей, таких как сгибы, отклонения от степенного поведения.



Рис. 1: График мощности ШАЛ.



Рис. 2: График мощности ШАЛ, домноженный на $N_{e}^{1.5}$.

4.2 Спектры мощностей для разных диапозонов углов

В рамках данной работы было произведено разделение моделируемых событий по интервалам зенитных углов падения первичной частицы: 0°–18°, 18°–25°, 25°–30°, 30°–35°, 35°–37°. Для каждого интервала были построены спектры мощности ШАЛ рис.3, рис.4.

Полученные результаты демонстрируют, что с увеличением зенитного угла общее число вторичных частиц, достигающих уровня наблюдения, уменьшается. Это связано с тем, что при больших углах падения первичная частица и образующийся каскад проходят большее расстояние в атмосфере до достижения уровня наблюдения. В результате часть вторичных частиц успевает рассеяться или поглотиться, что приводит к уменьшению наблюдаемой мощности ливня. В первом приближении такую зависимость от зенитного угла можно рассматривать как аналог зависимости от толщины атмосферы: чем больше угол, тем длиннее путь частицы в атмосфере и, соответственно, тем "старее"становится ливень к моменту достижения уровня наблюдения. Таким образом, зенитный угол оказывает влияние, схожее с эффектом увеличения толщины атмосферы.



Рис. 3: Графики мощностей ШАЛ для разных углов.



Рис. 4: Графики мощностей ШАЛ, домноженные на $N_e^{1.5}$.

4.3 Сравнение с экспериментальными данными

Результаты, полученные в ходе моделирования ШАЛ с использованием программы CORSIKA, были сопоставлены с экспериментальными данными, полученными на установке НЕВОД-ШАЛ за период с 2018 по 2023 год рис.5. За это время было зарегистрировано порядка 157 миллионов событий, что обеспечивает высокую статистическую достоверность измерений.

Сравнение спектров мощности ливней показало существенные различия между модельными рис.4 и экспериментальными результатами рис.5. В частности, на экспериментальных данных чётко наблюдается характерный излом (колено) спектра в диапазоне $N_e \sim 10^{5} \, 10^6$, положение которого значительно зависит от зенитного угла.

В противоположность этому, в спектрах, полученных с помощью моделирования для протонов, излом не наблюдается. Модельные кривые демонстрируют плавное поведение без резких изменений наклона во всём диапазоне значений N_e . Это указывает на недостаточно большую статистику моделированных данных, а также возможную необходимость уточнения используемых моделей взаимодействий для точного воспроизведения экспериментальных данных.



Рис. 5: Спектр мощности, построенный на основе экспериментальных данных с установки НЕВОД-ШАЛ.

5 Эксперимент "Адрон"

Эксперимент «Адрон» проводился на Тянь-Шаньской высокогорной станции в течение шести лет — с 1985 по 1991 год. Под руководством С.И. Никольского на Тянь-Шане был развит комплексный метод исследования широких атмосферных ливней (ШАЛ). Экспериментальная установка включала в себя ливневую систему для регистрации электронов и мюонов с пороговыми энергиями в несколько ГэВ, большой ионизационный калориметр площадью 44 м² для исследования стволов ливней, а также систему детекторов для регистрации черенковского излучения. Калориметр содержал также рентгенэмульсионную камеру (РЭК) с движущимися плёнками, часть материала которой фиксировала высокоэнергичные каскады в стволах ШАЛ. Ключевым этапом развития метода стало создание комбинированной установки РЭК-ШАЛ, объединившей преимущества высокогорной регистрации с возможностями детального изучения каскадов. Такое объединение рентгенэмульсионной камеры с электронной ливневой системой позволило перейти к более глубокому исследованию ядерных взаимодействий при энергиях первичных частиц выше 1 ПэВ, где обычные ионизационные калориметры уже не обеспечивают требуемого пространственного разрешения и статистики.

Основной задачей эксперимента было изучение характеристик ядерных взаимодействий на основе параметров ШАЛ. Поскольку каскадное развитие в атмосфере сопровождается многократными взаимодействиями, прямое исследование элементарных актов затруднено. Однако отбор ливней, в которых формируются гамма-адронные семейства, зарегистрированные в РЭК, позволяет выделить события с эффективной высотой генерации семейств порядка 3–4 км над уровнем установки. Благодаря этому появляется возможность непосредственно анализировать энергетические и пространственные характеристики наиболее энергичных частиц в стволах ливня.

Центральная часть установки «Адрон» включала рентген-эмульсионную камеру и четыре ряда ионизационных камер, образующих так называемую толчковую установку (ТУ). Ливневая часть состояла из системы сцинтилляционных детекторов (СЦ), мюонного и наземных годоскопов на основе счетчиков Гейгера–Мюллера, а также пунктов регистрации черенковского излучения. Управление экспериментом осуществлялось в автоматизированном режиме с помощью ЭВМ, а данные с детекторов записывались на магнитную ленту с использованием специализированной системы регистрации. Схема установки представлена на рис.6



Рис. 6: Схема ливневой части установки "Адрон" 1 – Сцинтилляционные детекторы: 34(40) – 4 группы по 3 сц – 1²;

Сцинтилляционные детекторы: 55 м – 8 групп по 3 сц – 0.25^2 ;

2 – Сцинтилляционные детекторы: 16 м – 6 групп по $3 \text{ сц} - 0.25^2$;

Сцинтилляционные детекторы: 20 м – 4 группы по 2 сц – 1 2 ;

3 – Сцинтилляционные детекторы: 11 групп по 3 сц – 0.25^{-2} ;

4 – Сцинтилляционные детекторы: 4 группы 3 сц – 1²;

5 – Сцинтилляционные детекторы ПЕМА нейтронного монитора: 5 групп – 0.25²;

6 – Годоскопические детекторы МЮГО;

7 – Нейтронный монитор;

8 – Годоскопический детектор ДАГО;

9 – Черенковские детекторы. .

Таким образом, установка «Адрон» представляла собой уникальный пример комплексного эксперимента, объединяющего методы регистрации ШАЛ и изучения ядерных взаимодействий на высоких энергиях, с возможностью пространственно-энергетического анализа структуры каскадов непосредственно в стволе ливня.

6 Заключение

В ходе данной работы были изучены основные характеристики широких атмосферных ливней (ШАЛ), возникающих при взаимодействии космических лучей с атмосферой Земли. Были построены спектры мощности ШАЛ для различных интервалов зенитных углов. Проведено сравнение полученных результатов моделирования с экспериментальными данными, собранными на установке НЕВОД-ШАЛ.

Анализ показал, что в спектрах, полученных с использованием программы моделирования CORSIKA, отсутствует характерный излом ("колено"), наблюдаемый в экспериментальных данных.

В ходе выполнения работы были получены необходимые знания и практические навыки, позволяющие в дальнейшем проводить анализ данных, получаемых в эксперименте "Адрон"на ТШВНС.

Список литературы

- [1] Никольский С. И Широкие атмосферные ливни космического излучения. //Успехи физических наук. – 1962. – Т. 78. – №. 11. – С. 365-410.
- [2] Слепцов И. Е. 70 лет открытию явления «Широкие атмосферные лив-

ни» //Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2009. – №. 1. – С. 112-114.

- [3] Grieder P. K. F. Extensive air showers: high energy phenomena and astrophysical aspects-a tutorial, reference manual and data book. 2010.
- [4] D. Heck, J. Knapp, J.N. Capdevielle, G. Schatz, T. Thouw, CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers, Forschungszentrum, Karlsruhe, FZKA-6019, 1998.