

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Филиал федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ» в городе Алматы (АФ НИЯУ МИФИ)

УДК 539.1

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ
ЛИВНЕЙ
МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ CORSIKA**

Научный руководитель
PhD.

_____ Н.О. Садуев

Научный консультант

_____ Н.О. Ережеп

Студент

_____ В.Д. Филиппов

Алматы 2025

Содержание

Введение	2
Космические лучи	2
Взаимодействие космических лучей с атмосферой	2
Широкие атмосферные ливни	3
1 Цели и задачи	6
2 Установка и компиляция среды моделирования CORSIKA	7
3 Настройка параметров моделирования широких атмосферных ливней	8
4 Моделирование и обработка широких атмосферных ливней	9
5 Анализ данных	13
Заключение	15
Использованная литература и сервисы	16
Приложение А. Пример входного файла CORSIKA	17
Приложение В. Система координат в среде CORSIKA	18

ВВЕДЕНИЕ

Космические лучи

Космические лучи представляют собой поток ядер атомов, большей частью протонов, зародившихся и ускоренных до высоких энергий в космических объектах или в космическом пространстве. Практически под космическими лучами обычно понимают частицы с энергией выше нескольких сот МэВ. Однако с ними тесно связаны и частицы значительно меньших энергий - субкосмические, а также рентгеновское, γ -излучение и нейтрино [1].

Важнейшими свойствами галактического излучения являются его ядерный состав и энергетический спектр. При энергиях $E_0 \sim 0,1 - 10^5$ ГэВ эти характеристики космических лучей в окосолнечном пространстве могут изучаться непосредственно с помощью приборов, установленных на космических аппаратах. При $E_0 \gg 10^5$ ГэВ спектр и состав восстанавливаются (часто со значительными трудностями и неопределенностями) по вторичным процессам, которые вызваны в атмосфере Земли космическими частицами [1].

Взаимодействие космических лучей с атмосферой

Атмосфера Земли состоит в основном из трех газов: 78,1% азота ($Z = 7$, $A = 14$), 21% кислорода ($Z = 8$, $A = 16$) и небольшой примеси углекислого газа. Плотность воздуха на уровне моря равна $0.0012 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, а общее количество вещества в вертикальном столбе воздуха от уровня моря до границы атмосферы $1030 \frac{\text{г}}{\text{см}^2}$. Количество вещества, проходимого частицами в Галактике (в рамках однородной модели) равно $l^0 = 5 \frac{\text{г}}{\text{см}^2}$ [1].

Поскольку количество вещества проходимого частицами космических лучей в атмосфере гораздо больше количества вещества в Галактике, количество взаимодействий резко увеличивается, и космические лучи меняют свои свойства качественно, а не количественно. Частицы космических лучей, долетая до Земли, взаимодействуют с веществом в атмосфере.

Толщина атмосферы достаточна для того, чтобы в ней произошло до десятка последовательных столкновений первичной частицы. Возникающие при

столкновениях нуклонов с ядрами заряженные пионы или распадаются (с вероятностью, зависящей от энергии), или взаимодействуют с ядрами. Распавшиеся заряженные пионы порождают мюонную компоненту космических лучей и нейтрино, а нейтральные - электрон-фотонную. Совокупность перечисленных явлений называется ядерно-каскадным процессом [1].

Широкие атмосферные ливни

После взаимодействия первичной частицы образуется гигантский электрон-ядерный каскад, который представляет из себя поток большого количества вторичных частиц. Этот поток образовавшихся вторичных частиц называют широким атмосферным ливнем (ШАЛ).

Широкий атмосферный ливень достигает значительных размеров в глубине атмосферы. В качестве приблизительной оценки числа частиц N на уровне моря в зависимости от энергии первичной частицы E_0 можно использовать соотношение [2]:

$$N_0 = 10^{-10} E_0 \text{ [эВ]}$$

Широкий атмосферный ливень развивается вдоль траектории движения первичной частицы, которая определяет ось ливня. Вторичные частицы, образующиеся в процессе развития ливня, достигают поверхности Земли практически одновременно, формируя фронт ливня, имеющий вид почти плоского диска, перпендикулярного его оси. Толщина фронта ливня минимальна вблизи оси и возрастает по мере удаления от неё. При этом вторичные частицы распределяются по значительной площади, достигающей нескольких квадратных километров. Такое поперечное (латеральное) распределение частиц относительно оси ливня называют латеральным распространением широкого атмосферного ливня; оно обусловлено поперечными импульсами во взаимодействиях и множественным рассеянием вторичных частиц в атмосфере.

Вторичные частицы в широких атмосферных ливнях делят на три компоненты [2]:

- **Электрон-фотонная компонента.** В основном рождается как следствие распада π^0 мезона.

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

- **Мюонная компонента.** В основном рождается как следствие распада заряженных $\pi^\pm$ мезонов.

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

- **Адронная компонента.** Рождается как следствие адронных взаимодействий первичной частицы и вторичных адронов с ядрами атмосферы.

Электроны и фотоны обладают свойством быстро размножаться. Они составляют 95-98% всех частиц в центральной части и 80% на расстоянии 200-250 м от центра ливня [1]. Именно поэтому наиболее простым способом регистрации ШАЛ является регистрация их электрон-фотонной компоненты. В настоящее время для наблюдения ШАЛ преимущественно используются комплексные установки.

Одним из таких комплексов служит Тянь-Шанская высокогорная научная станция, расположенная в 50-ти километрах от Алматы в горах Заилийского Алатау на северной широте 43.02° и восточной долготе 76.57° , на высоте 3340 метров н.у.м. В настоящий момент на Тянь-Шанской научной станции используются детекторы электронов, мюонов, годоскопические счётчики и другие установки (см. рисунок 1).

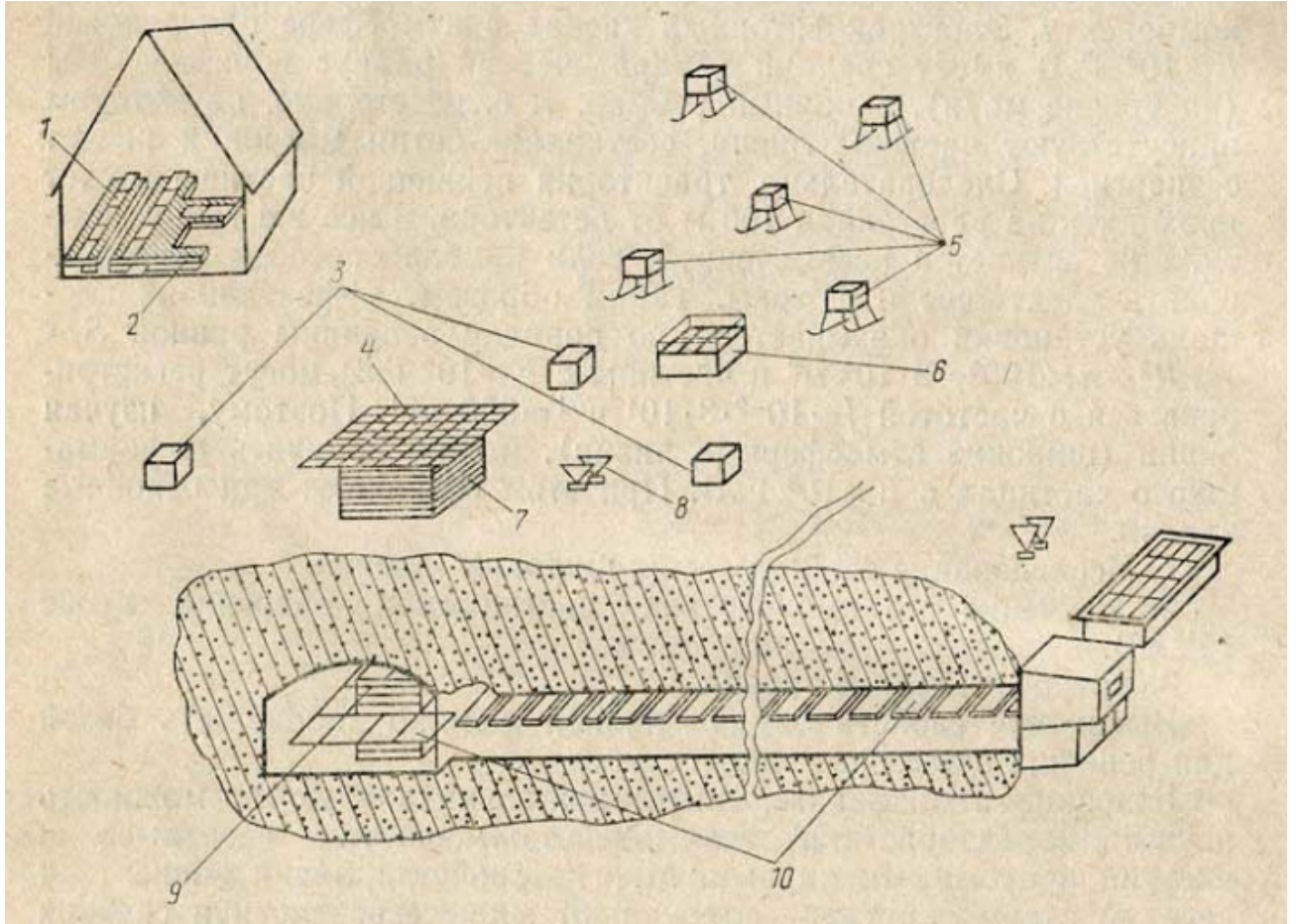


Рисунок 1 — Комплексная установка для исследования широких атмосферных ливней на Тянь-Шане, созданная коллективом под руководством С. И. Никольского: 1 - детектор электронов (45 м^2); 2 - детектор мюонов (45 м^2); 3 - детектор времени прихода частиц ливня; 4 - сцинтилляционные счетчики (64 м^2); 5 - Детекторы положения ствола ливня; 6 - годоскопические счетчики; 7 - ионизационный калориметр; 8 - воздушные черенковские счетчики; 9 - подземный калориметр; 10 - подземный детектор мюонов [1].

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Целью данной научно-исследовательской работы является исследование процессов формирования и развития широких атмосферных ливней, а также изучение влияния типа и энергии первичной космической частицы на характеристики вторичных частиц.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие задачи:

- изучить теоретические основы формирования широких атмосферных ливней;
- освоить программный комплекс CORSIKA и изучить принципы его функционирования;
- выполнить моделирование широких атмосферных ливней с использованием среды моделирования CORSIKA;
- провести анализ пространственных и временных распределений вторичных частиц в широких атмосферных ливнях.

2. УСТАНОВКА И КОМПИЛЯЦИЯ СРЕДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ CORSIKA

CORSIKA (COsmic Ray Simulations for KAscade) — программный комплекс для детального моделирования широких атмосферных ливней, инициированных высокоэнергетическими частицами космических лучей, основанный на методе Монте-Карло. В качестве первичных частиц могут рассматриваться протоны, лёгкие и тяжёлые ядра вплоть до железа, фотоны и другие частицы [3].

При компиляции программного обеспечения CORSIKA предусмотрен выбор моделей адронных взаимодействий. В рамках данной работы были использованы следующие модели:

- QGSJETII-04 (Quark Gluon String model with JETs) — для описания высокоэнергетических ($E > 80$ ГэВ) адронных взаимодействий. Данная модель основана на кварк-глюонной струнной картине адронных столкновений [3].
- GHEISHA 2002d (Gamma Hadron Electron Interaction SHower code) — для моделирования низкоэнергетических ($E < 80$ ГэВ) адронных взаимодействий. Модель используется в CORSIKA для расчёта упругих и неупругих сечений адронов в воздухе, а также для описания вторичного образования частиц [3].

Одним из ключевых параметров при компиляции среды моделирования CORSIKA является геометрия детектора. В данной работе использовалась горизонтальная геометрия детектора.

3. НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ

При моделировании широких атмосферных ливней задаётся набор входных параметров (пример входного файла приведён в приложении А), определяющих характеристики первичной частицы и точку наблюдения на Земле. К таким параметрам относятся:

- тип первичной частицы;
- энергия первичной частицы;
- полярный и азимутальный углы падения первичной частицы;
- уровень наблюдения;
- компоненты магнитного поля Земли.

Параметры, связанные с точкой наблюдения, задавались в соответствии с географическим расположением Тянь-Шанской высокогорной научной станции (ТШВНС):

- уровень наблюдения: 3340 м над уровнем моря;
- магнитное поле Земли:
 - горизонтальная компонента: $B_x = 24.48 \mu\text{T}$;
 - вертикальная компонента (ось z направлена к Земле): $B_z = 50.02 \mu\text{T}$.

Значения компонент магнитного поля получены с помощью онлайн-сервиса NOAA [4].

В данной работе азимутальный угол падения первичной частицы может принимать любые значения, тогда как полярный угол рассматривается фиксированным и равным 0° (см. систему координат CORSIKA в приложении В).

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ

При выполнении данной работы были смоделированы девять ливней, для нахождения зависимости количества рождаемых вторичных частиц от типа и энергии первичной частицы.

E_0 , эВ	Частица	Seed	Количество вторичных частиц				
			N_Σ	N_γ	N_e	N_μ	N_{had}
10^{13}	p	1 0 0; 1 0 0	12549	10422	1906	204	17
	$^{12}_6\text{C}$	2 0 0; 2 0 0	4848	3944	624	260	20
	$^{56}_{26}\text{Fe}$	3 0 0; 3 0 0	3309	2539	408	318	44
10^{14}	p	2 1 0; 1 0 0	235936	186838	46589	1964	545
	$^{12}_6\text{C}$	3 2 1; 2 0 0	146084	120515	23271	2077	221
	$^{56}_{26}\text{Fe}$	4 3 2; 3 0 0	67844	54838	10497	2317	192
10^{15}	p	3 2 1; 1 0 0	2818714	2301317	500326	14558	2513
	$^{12}_6\text{C}$	4 3 2; 2 0 0	1510042	1239866	252394	15638	2144
	$^{56}_{26}\text{Fe}$	5 4 3; 3 0 0	1353732	1111861	221674	18054	2143

Таблица 1 — Результаты моделирования зависимости количества вторичных частиц в широких атмосферных ливнях в зависимости от типа и энергии первичной частицы

Рассмотрим подробнее широкий атмосферный ливень для первичной частицы $^{56}_{26}\text{Fe}$ с энергией $E = 10^{14}$ эВ. Рассмотрим для этого ливня радиальное распределение вторичных частиц, распределение каждой из компонент в плоскости детекторов X-Y, временную карту прибытий для каждой из компонент ШАЛа. За начало отсчёта в CORSIKA принимается ось ливня.

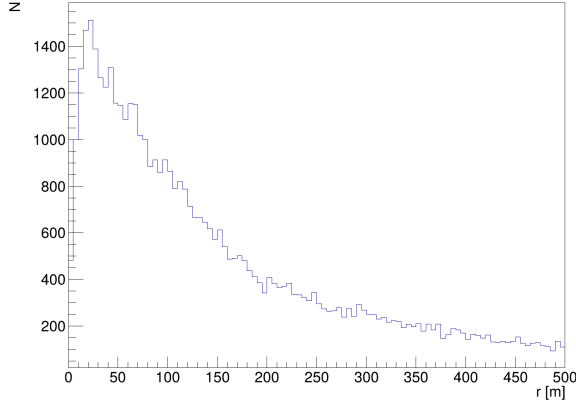


Рисунок 2 — Фотоны: радиальное распределение частиц, количество частиц N vs. радиус r [м].

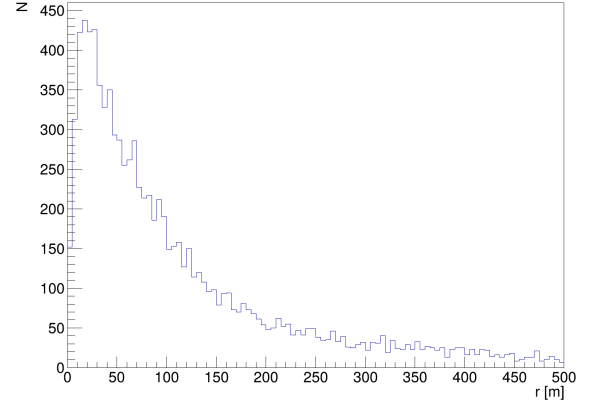


Рисунок 3 — Электроны: радиальное распределение частиц, N vs. r [м].

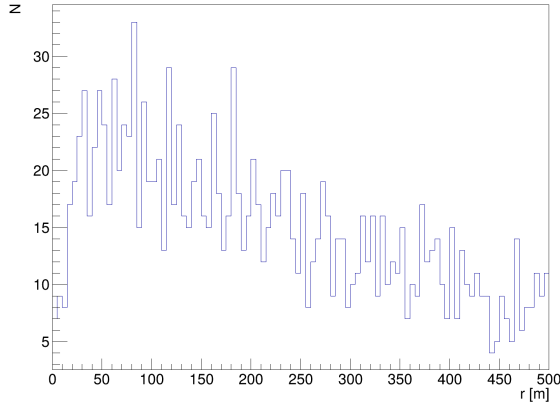


Рисунок 4 — Мюоны: радиальное распределение частиц, N vs. r [м].

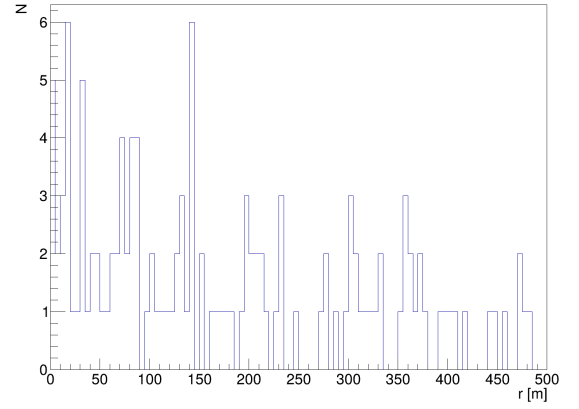


Рисунок 5 — Адроны: радиальное распределение частиц, N vs. r [м].

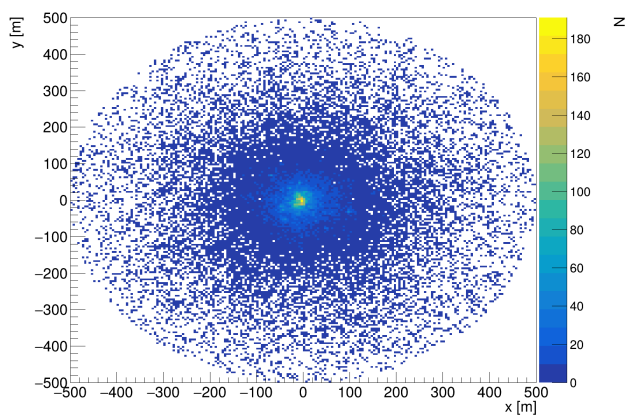


Рисунок 6 — Фотоны: распределение частиц на плоскости XY [м].

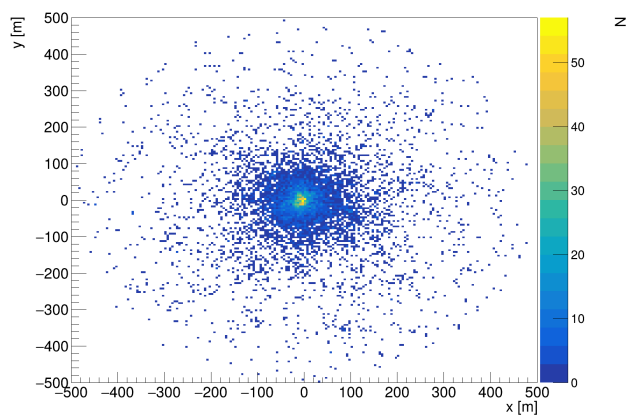


Рисунок 7 — Электроны: распределение частиц на плоскости XY [м].

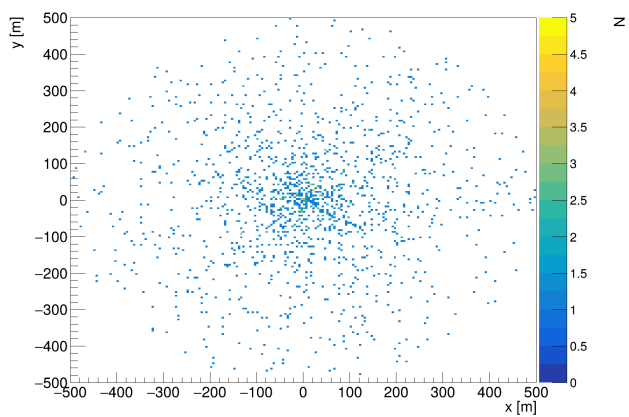


Рисунок 8 — Мюоны: распределение частиц на плоскости XY [м].

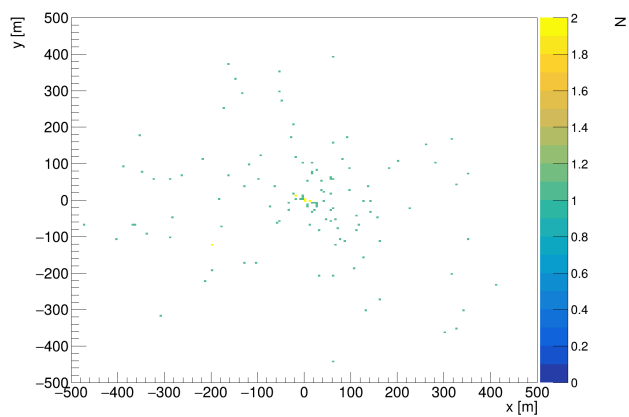


Рисунок 9 — Адроны: распределение частиц на плоскости XY [м].

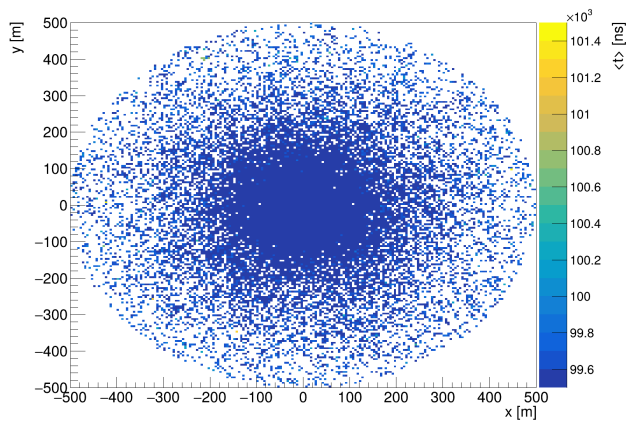


Рисунок 10 — Фотоны: карта времени прихода частиц $\langle t \rangle$ [нс] на плоскости ХУ.

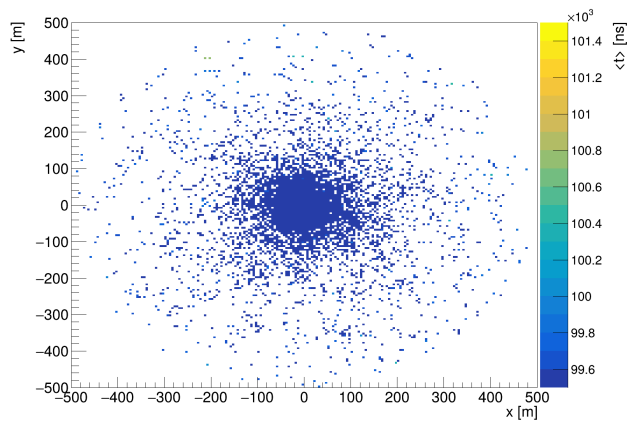


Рисунок 11 — Электроны: карта времени прихода частиц $\langle t \rangle$ [нс] на плоскости ХУ.

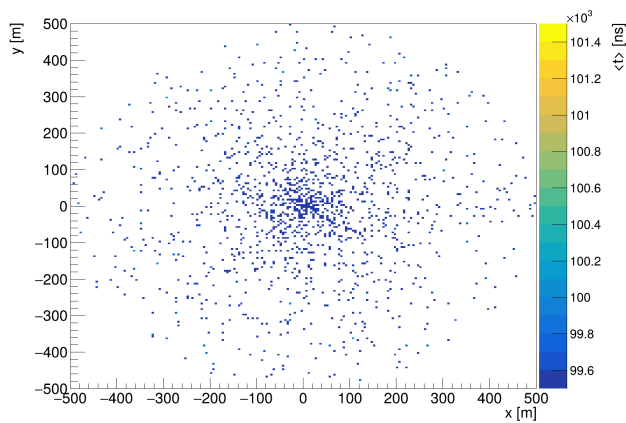


Рисунок 12 — Мюоны: карта времени прихода частиц $\langle t \rangle$ [нс] на плоскости ХУ.

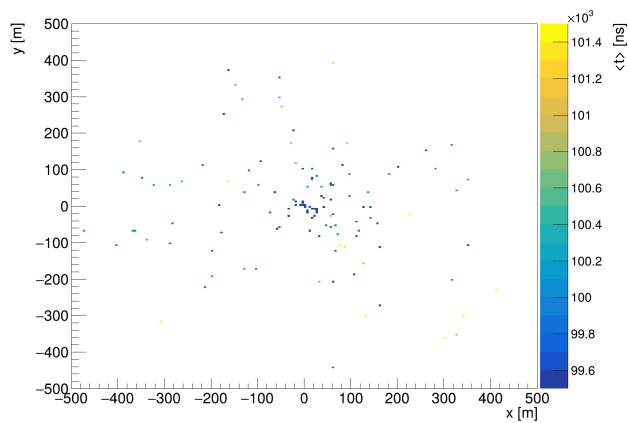


Рисунок 13 — Адроны: карта времени прихода частиц $\langle t \rangle$ [нс] на плоскости ХУ.

5. АНАЛИЗ ДАННЫХ

Анализируя данные, представленные в таблице 1, можно сделать несколько наблюдений:

- Общее количество вторичных частиц N_Σ увеличивается с ростом энергии первичной частицы. Для первичного протона при $E_0 = 10^{13}$ эВ число задетектированных вторичных частиц $N_\Sigma = 12549$, тогда как при $E_0 = 10^{15}$ эВ $N_\Sigma = 2818714$. Аналогичная тенденция наблюдается и для ядер углерода и железа.
- При фиксированной энергии количество вторичных частиц на уровне наблюдения уменьшается с увеличением массового числа ядра. При энергиях $E_0 = 10^{14}$ эВ:
 - $N_\Sigma^p = 235936$,
 - $N_\Sigma^C = 146084$,
 - $N_\Sigma^{Fe} = 67844$.

Рассмотрим поведение различных компонент ливня:

- Электрон-фотонная компонента (N_e, N_γ) — Электрон-фотонная компонента является наиболее многочисленной на уровне наблюдения: согласно результатам моделирования, на её долю приходится порядка 80–85% общего числа частиц. Увеличение количества электронов и фотонов происходит практически пропорционально росту энергии первичной частицы. Именно эта компонента в основном определяет формирование фронта широкого атмосферного ливня.
- Мюонная компонента (N_μ) — формируется из распада вторичных пионов. На уровне наблюдения её количество зависит от высоты первого столкновения: чем выше оно произошло, тем больше поколений адронов успевают образоваться, и тем больше мюонов достигает Земли. Тяжёлые ядра рождают больше мюонов, чем протоны той же энергии, поскольку их каскад начинается раньше и включает больше нуклонов.

- Адронная компонента (N_{had}) — остаточные адроны, в основном пионы и каоны, которые доходят до Земли, не распавшись. Её количество зависит от типа первичного ядра и высоты первого столкновения: чем выше начинается каскад, тем больше адронов теряется в последующих взаимодействиях, и меньше доходит до уровня наблюдения.

Сравнение с данными таблицы показывает, что:

- Увеличение энергии E_0 приводит к росту всех компонент ливня, особенно электрон-фотонной.
- При увеличении массового числа первичной частицы ливень развивается раньше, а его максимум находится выше в атмосфере. Это приводит к уменьшению числа частиц на уровне наблюдения. Такое поведение физически обусловлено более коротким пробегом и большей вероятностью взаимодействия тяжёлых ядер.
- Электрон-фотонная компонента растёт быстрее и доминирует в числе частиц, потому что электромагнитные взаимодействия порождают каскадное размножение γ и e^-/e^+ , что делает эту компоненту «мягкой» и многочисленной. Адронная и мюонная компоненты формируются из распадов π и K , имея меньшее количество частиц.

Таким образом, результаты моделирования подтверждают теоретические ожидания: структура ШАЛ зависит как от энергии, так и от массы первичного ядра, распределение частиц по компонентам на уровне наблюдения зависит в большей степени от типа первичной частицы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении данной научно-исследовательской работы были изучены теоретические аспекты возникновения и развития широких атмосферных ливней. Для моделирования ливней был установлен и освоен метод CORSIKA, что позволило смоделировать ШАЛ различной энергии, инициированные разными первичными частицами.

Для вторичных компонент ливней были построены три типа распределений: радиальное распределение, распределение на плоскости и карта времени прихода частиц.

Проанализированы зависимости количества вторичных частиц, глубины максимума каскада и распределения компонентов (электрон-фотонной, мюонной, адронной) от энергии и типа первичной частицы. Результаты моделирования показали согласованность с теоретическими ожиданиями.

Таким образом, работа позволила подтвердить ключевые закономерности формирования ШАЛ и показать роль энергии и состава первичной частицы в развитии различных компонент ливня.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА И СЕРВИСЫ

1. *Мурзин В. С.* Введение в физику космических лучей. — 1979.
2. *Grupen C.* Astroparticle physics. — Springer, 2005.
3. *Heck D., Pierog T.* Extensive Air Shower Simulation with CORSIKA: A User's Guide, Version 7.7100 / Karlsruhe Institute of Technology (KIT). — Karlsruhe, Germany, 2019. — Available from the CORSIKA documentation page: <https://www.iap.kit.edu/corsika/>.
4. *NOAA National Centers for Environmental Information.* Geomagnetic Field Calculator. — 2024. — Accessed: 2025-03-21. <https://www.ncei.noaa.gov/products/geomagnetic-utility-programs>.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПРИМЕР ВХОДНОГО ФАЙЛА CORSIKA

```

RUNNR 1 run number
EVTNR 1 number of first shower event
NSHOW 1 number of showers to generate
PRMPAR 14 particle type of prim. particle
ESLOPE -2.7 slope of primary energy spectrum
ERANGE 1.E4 1.E4 energy range of primary particle
THETAP 0. 0. range of zenith angle (degree)
PHIP -180. 180. range of azimuth angle (degree)
SEED 1 0 0 seed for 1. random number sequence
SEED 1 0 0 seed for 2. random number sequence
OBSLEV 3340.E2 observation level (in cm)
FIXCHI 0. starting altitude (g/cm**2)
MAGNET 24.48 50.02 magnetic field centr. Europe
HADFLG 0 0 0 0 0 2 flags hadr.interact.&fragmentation
ECUTS 0.3 0.3 0.003 0.003 energy cuts for particles
MUADDI T additional info for muons
MUMULT T muon multiple scattering angle
ELMFLG T T em. interaction flags (NKG,EGS)
STEPFC 1.0 mult. scattering step length fact.
RADNKG 200.E2 outer radius for NKG lat.dens.distr.
LONGI T 10. T T longit.distr. & step size & fit & out
MAXPRT 1 max. number of printed events
DIRECT ../../results/radial_distr/ output directory
USER you user
DEBUG F 6 F 1000000 debug flag and log.unit for out
EXIT terminates input

```

Рисунок 14 — Пример входного файла all-inputs.

ПРИЛОЖЕНИЕ В. СИСТЕМА КООРДИНАТ В СРЕДЕ CORSIKA

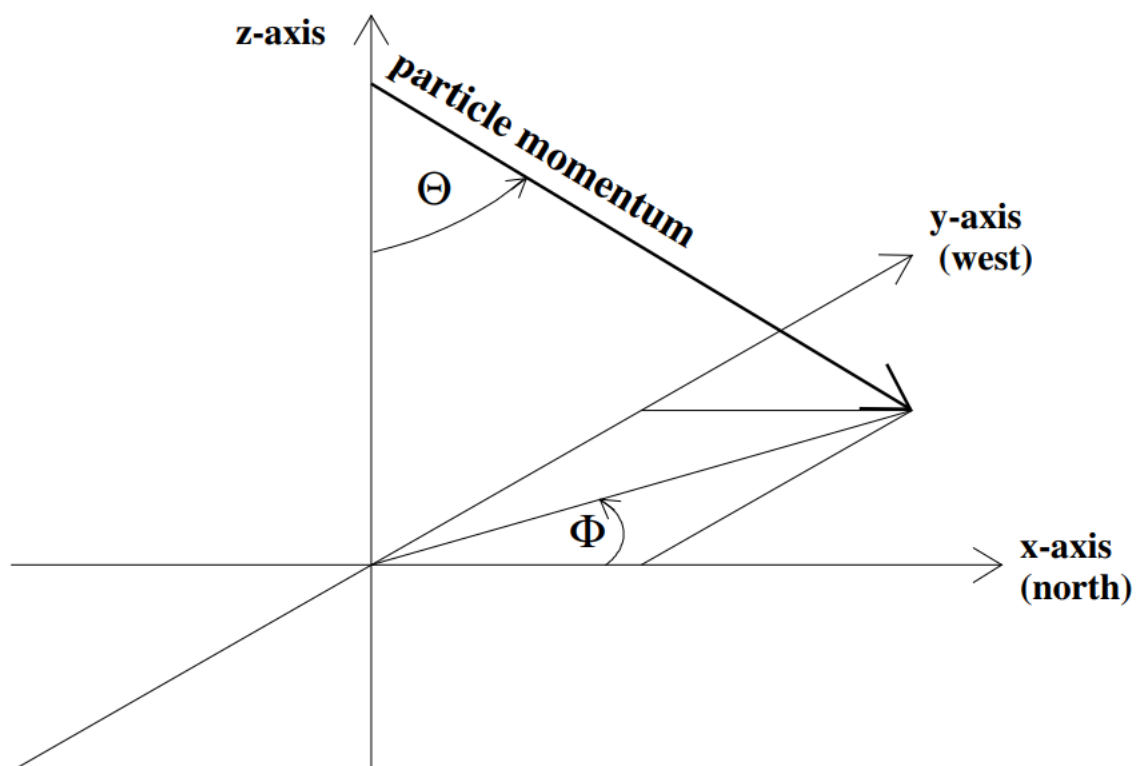


Рисунок 15 — Система координат в CORSIKA [3].