

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ЭЛЕКТРОНИКИ И ФИЗИКИ

Кафедра радиофизики и теоретической физики

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ  
ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ ШАЛ В  
МОДИФИЦИРОВАННОЙ ВЕРСИИ КОДА CORSIKA

Выпускная квалификационная работа  
(бакалаврская работа)

«Допустить к защите»  
Заведующий кафедрой РФиТФ  
д.ф.-м.н., профессор  
\_\_\_\_\_ А. А. Лагутин

«\_\_\_\_\_» июня 2020 г.

Выполнил студент  
4 курса 561 группы  
Бурлаков Константин Алексеевич

\_\_\_\_\_ Научный руководитель  
к.ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_ Н. В. Волков

Выпускная квалификационная  
работа защищена «\_\_\_\_\_» июня 2020 г.  
Оценка \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Председатель ГЭК  
д.т.н., профессор

\_\_\_\_\_ В. Я. Федянин

# Реферат

## выпускной квалификационной работы «Расчет температурных коэффициентов электронной компоненты ШАЛ в модифицированной версии кода CORSIKA».

Квалификационная работа состоит из введения, двух глав, заключения и списка литературы. Объем работы 47 страниц. Содержит 6 рисунков и 1 таблицу. Список литературы включает 21 наименование.

Ключевые слова: широкие атмосферные ливни, код CORSIKA, функциональная теория чувствительности, радиальное распределение электронов, скейлинговая функция, температурные коэффициенты.

Объектом исследования является программный код CORSIKA, разработанный для моделирования широких атмосферных ливней, инициированных в атмосфере Земли высокоэнергетичными гамма-квантами, протонами, ядрами и другими элементарными частицами. Цель работы — модификация модуля НКГ, предназначенного для расчета функции пространственного распределения электронов, а также модификация данного модуля для учета влияния температурных эффектов атмосферы на развитие ШАЛ и расчет нормированных температурных коэффициентов для изотермической модели атмосферы и модели US76.

Основными источниками информации при решении задач работы являются документация к пакету CORSIKA, а также описание исходного кода в комментариях разработчиков данного программного комплекса.

Главным результатом работы являются модификация модуля НКГ расчета радиального распределения электронов ШАЛ вычислительного комплекса CORSIKA, позволяющая описать не только пространственное распределение электронной компоненты, но и их вариационные производные для изотермической модели атмосферы и модели US76.

# Содержание

<b>Введение</b>	<b>4</b>
<b>Глава 1. Обзор программного кода CORSIKA</b>	<b>8</b>
1.1. Описание взаимодействий частиц . . . . .	8
1.1.1. Электромагнитные взаимодействия . . . . .	9
1.1.2. Адронные взаимодействия при низких энергиях . . . . .	10
1.1.3. Адронные взаимодействия при сверхвысоких энергиях . . . . .	10
1.2. Управление и запуск . . . . .	11
1.3. Частицы . . . . .	12
1.4. Система координат . . . . .	12
1.5. Модель атмосферы . . . . .	13
1.6. Генератор случайных чисел . . . . .	14
1.7. Пространственное распределение частиц ШАЛ . . . . .	14
1.7.1. ФПР электронов ШАЛ . . . . .	15
1.7.2. Модуль NKG кода CORSIKA . . . . .	17
1.7.3. Код модуля NKG . . . . .	21
1.8. Результаты главы . . . . .	26
<b>Глава 2. Модификация и расчет температурных коэффициентов</b>	<b>27</b>
2.1. Опция НКГ кода CORSIKA . . . . .	27
2.2. Вариации температурного профиля атмосферы . . . . .	28

2.3. Модификация модуля НКГ . . . . .	30
2.4. Анализ результатов . . . . .	37
2.5. Результаты главы . . . . .	41
<b>Заключение</b>	<b>43</b>
<b>Литература</b>	<b>45</b>

# Введение

**Актуальность проблемы.** Анализ экспериментальных данных по широким атмосферным ливням (ШАЛ) или планирование наземных экспериментов по регистрации ШАЛ требуют детального моделирования каскадных процессов, развивающихся в атмосфере Земли, в результате прохождения в ней первичных высокоэнергетических частиц. Моделирование может быть проведено с использованием численных методов Монте-Карло с учетом современных знаний о характере сильных и электромагнитных взаимодействий при высоких энергиях. Для решения этой задачи был разработан комплекс компьютерных программ CORSIKA.

CORSIKA (COsmic Ray Simulation for KAscade) — это численная Монте-Карловская программа для изучения эволюции ШАЛ в атмосфере Земли, инициируемых первичными фотонами, протонами, ядрами или другими частицами [1]. Первоначально код был разработан для интерпретации данных эксперимента KASCADE, спланированного в Технологическом институте Карлсруэ (Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Германия) [2].

На сегодняшний день область применения кода CORSIKA распространяется от экспериментов на черенковских телескопах ( $E_0 \approx 10^{12}$  эВ) до самых высоких наблюдаемых энергий ( $E_0 > 10^{20}$  эВ). Разработчики кода CORSIKA руководствовались идеей восстанавливать в результате моделирования не только достоверные средние значения наблюдаемых величин, но и воспроизводить их флуктуации. Поэтому программные модули кода включают все известные процессы, которые могут оказать

заметное влияние на количественные характеристики ШАЛ. Это касается прохождения частиц через атмосферу, а также их взаимодействия с компонентами воздуха. Траектории всех вторичных частиц точно отслеживаются, характеристики частиц сохраняются при достижении уровня наблюдения. Такой подход позволяет детально проанализировать все особенности смоделированных ливней.

Одной из самых серьезных проблем при моделировании ШАЛ является корректное описание адронных взаимодействий при высоких энергиях, которые не охватываются экспериментальными данными. Дело в том, что современные ускорители ограничены в своей максимально достижимой энергии до значений, намного меньших, чем те, которые обнаруживаются в космических лучах. Единственным выходом является экстраполяция результатов с использованием теоретических моделей. По мере развития модели CORSIKA в код были добавлены программные модули различных моделей адронных взаимодействий при высоких энергиях: VENUS, QGSJET [3], DPMJET и SIBYLL [4], которые описывают неупругие адронные взаимодействия. Для обработки низкоэнергетичных адронных взаимодействий была добавлена процедура GHEISHA.

Электромагнитные взаимодействия рассчитываются двумя способами: с использованием Монте-Карловского пакета EGS4 (Electron Gamma Shower system version 4) [5] или с использованием аналитического приближения Нишимуры-Каматы-Грейзена [6].

Код CORSIKA, изначально разработанный для решения задач эксперимента KASCADE, на сегодняшний день является стандартным инструментом в области физики космических лучей сверхвысоких энергий и широко применяется различными исследовательскими группами для теоретических предсказаний и интерпретации экспериментальных данных.

В силу того, что свойства атмосферы, в которой происходит разви-

тие ШАЛ и ЭФК изменяются, для корректного описания характеристик ливня требуется, вообще говоря, учет изменений свойств атмосферы. В работе это сделано с использованием функциональной теории чувствительности, созданной в Алтайском государственном университете.

**Целью работы** является модификация модуля НКГ расчета радиального распределения электронов ШАЛ вычислительного комплекса CORSIKA, позволяющая описать не только пространственное распределение электронной компоненты в парциальных электронно-фотонных каскадах от гамма-квантов, но и их вариационные производные, т.е. дифференциальные температурные коэффициенты.

**Решаемые задачи:**

1. Изучение структуры программного комплекса CORSIKA. Конфигурация кода для проведения расчетов функции пространственного распределения (ФПР) электронов в двух режимах: с использованием приближенного аналитического решения НКГ и прямым моделированием с использованием модуля EGS4.
2. Модификация блока НКГ кода CORSIKA для расчета температурных коэффициентов электронной компоненты ШАЛ. Отладка и настройка модифицированного кода.
3. Расчет нормированных температурных коэффициентов для изотермической модели атмосферы и модели US76.
4. Анализ полученных результатов, формулировка выводов.

**Структура и объем работы.** Квалификационная работа состоит из введения, двух глав и заключения. Объем работы 47 страниц.

**Во введении** формулируется исследуемая проблема, обсуждается актуальность работы, ее цель и решаемые задачи.

**Первая глава** посвящена изучению структуры и принципов работы программного комплекса CORSIKA. Рассматриваются модули электромагнитных и сильных адронных взаимодействий. Проводится подготовка рабочей среды для модификации и дальнейших расчетов.

**Во второй главе** предлагается альтернативный подход к описанию ФПР электронов, основанный на использовании скейлингового формализма, предложенного в АлтГУ. Для описания температурного эффекта используются результаты функциональной теории чувствительности, также созданной в АлтГУ. Проводится модификация модуля НКГ кода CORSIKA. Выполнены расчеты температурных коэффициентов.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы работы.



# Глава 1

## Обзор программного кода CORSIKA

В главе дается описание структуры и принципов работы программного комплекса CORSIKA. Рассматриваются модули электромагнитных и сильных адронных взаимодействий. Проводится подготовка рабочей среды для модификации и дальнейших расчетов.

### 1.1. Описание взаимодействий частиц

Как отмечено во введении, основная цель разработчиков CORSIKA — достоверное описание средних значений экспериментально измеряемых параметров ШАЛ, а также точное воспроизведение их флуктуаций около средних величин. Очевидно, что процесс развития ШАЛ — это полностью стохастический случайный процесс, который не возможно описать аналитически, поэтому каждый этап «жизни» в атмосфере Земли отдельной частицы в цепочке событий «перенос — взаимодействие — распад» описывается в терминах численных методов Монте-Карло.

В пакете CORSIKA первичная частица отслеживается до первого взаимодействия с ядром воздуха (или распада, в случае нестабильной частицы). После этого программа отслеживает все вторичные частицы, образовавшиеся в атмосфере, регистрируя их распад, пробег, взаимодействие и рождение новых частиц. В завершении процесса, при достижении частицами уровня наблюдения, их параметры — импульс, координаты и время с момента первого взаимодействия сохраняются для дальнейшей обработки. Для моделирования взаимодействий частиц разных видов

CORSIKA использует соответствующие программные модули для записи кодов генераторов таких взаимодействий.

Все взаимодействия можно условно разделить на несколько типов:

- электромагнитные взаимодействия,
- адронные взаимодействия при низких энергиях,
- адронные взаимодействия при сверхвысоких энергиях.

### 1.1.1. Электромагнитные взаимодействия

Как отмечено во введении, электромагнитные взаимодействия в коде CORSIKA рассчитываются двумя способами: с использованием Монте-Карловского пакета EGS4 (Electron Gamma Shower system version 4) [5] или с использованием аналитического приближения Нишимуры-Каматы-Грейзена [6].

При выборе опции EGS4, в коде CORSIKA подключаются модули полного расчета электромагнитной компоненты методом Монте-Карло. Модуль EGS4 моделирует электрон-позитронную аннигиляцию, мольеровское и множественное рассеяние. Для гамма-квантов учитываются все физические процессы: комптоновское рассеяние, рождение электрон-позитронных пар и фотоэлектрические реакции. Важной особенностью блока EGS4 является моделирование рождения мюонных пар. EGS4 дает более подробную информацию о частицах на уровне наблюдения, а вызов процедур этого модуля с использованием стохастических методов позволяет учитывать флуктуации развития ливня.

Вместо EGS4 можно выбрать режим работы кода с использованием более быстрого алгоритма расчета электромагнитных взаимодействий, основанного на аналитическом приближении Нишимуры-Каматы-Грейзена. Однако, преимущество в скорости расчетов в этом режиме приводит к падению точности результатов и позволяет получить лишь средние плотности электронов на уровне наблюдения.

### 1.1.2. Адронные взаимодействия при низких энергиях

На современном этапе развития физики атомного ядра и частиц адронные столкновения описываются в виде множественных партонных (кварк-глюонных) каскадов. При энергиях, характерных для ШАЛ, недостижимых в наземных лабораторных условиях, такие взаимодействия невозможно описать в рамках существующих теорий. В связи с этим обстоятельством предсказания моделей, разработанных для ускорительных экспериментов, зачастую дают значительные расхождения с данными по космическим лучам.

Для решения этой проблемы современные модели для космических лучей используют интегральный подход: экстраполяция данных ускорительных экспериментов плюс численное моделирование методами Монте Карло.

Для обработки низкоэнергичной компоненты ШАЛ ( $E \leq 80$  ГэВ) в пакете CORSIKA включены модули GHEISHA и UrQMD. Коды этих модулей интегрированы в основной код и доступны для изучения. Наряду с этими моделями, имеется возможность подключения стороннего пакета FLUKA [7] с закрытым кодом.

Все эти модели основаны на хорошо изученных свойствах ядерных взаимодействий и учитывают обширный пласт ускорительных данных.

### 1.1.3. Адронные взаимодействия при сверхвысоких энергиях

В астрофизике высоких энергий широко используются модели адронных взаимодействий, созданные специально для изучения свойств ШАЛ: QGSJet01 (Quark-Gluon Strings with Jets), QGSJet II [3] и SIBYLL [4]. Относительно недавно стала широко использоваться модель EPOS [8], представляющая класс чисто ускорительных моделей, адаптированная для сверхвысоких энергий.

Выбор конкретной модели взаимодействия производится пользователем на этапе конфигурации кода CORSIKA.

## 1.2. Управление и запуск

Весь процесс моделирования определяется пользователем в специальном конфигурационном файле, который во время запуска кода передается для чтения в качестве входного файла [9].

Конфигурационный файл в частности включает:

1. Тип первичной частицы, инициирующей ШАЛ
2. Энергия первичной частицы. Это значение может быть выбрано случайным образом в определенном диапазоне энергий с заданным наклоном энергетического спектра.
3. Угол прихода первичной частицы. Может быть задан равным фиксированному значению или выбран случайным образом в пределах углового диапазона таким образом, чтобы получить экспериментально наблюдаемую интенсивность потока частиц равномерно со всех направлений в небо.
4. Атмосферные параметры. Выбор атмосферной модели производится для изучения сезонных влияний на параметры ШАЛ.
5. Уровень наблюдения. Можно определить до 10 уровней наблюдения. Данные о всех частицах, достигающих этих уровней, регистрируются до тех пор пока энергия частицы превышает пороговое значение, заданное для адронов, мюонов, электронов и фотонов по отдельности.
6. Выбор моделей адронных взаимодействий.
7. Выбор моделей электромагнитных взаимодействий.
8. Используя опцию «thining», можно указать уровень статистического прореживания, определяющий порог энергии при достижении которого, частица выбывает из рассмотрения.

### 1.3. Частицы

В базе данных программного кода CORSIKA поддерживается работа более чем с 200 типами элементарных частиц [10]. В рамках кода они идентифицируются по количеству протонов и нейтронов. Параметры всех этих частицы отслеживаются во время моделирования. При их распространении в атмосфере учитываются их взаимодействия, аннигиляция и/или распад, а также генерация вторичных частиц.

Все частицы полностью определены в программе и имеют идентификационный номер. Каждая из них характеризуется Лоренц-фактором, зенитным и азимутальным углом траектории, временем, прошедшим с момента первого взаимодействия первичной частицы, и тремя пространственными координатами  $x$ ,  $y$  и  $z$ . Массы частиц и зарядовые состояния хранятся в массиве для быстрого доступа во время вычислений. Идентификаторы частиц и массы элементарных частиц взяты из кода моделирования GEANT [11–14] с расширениями для 4 видов нейтрино и резонансных состояний. Массы ядер взяты как сумма составляющих масс нуклонов, пренебрегая энергиями связи. Если необходимо учитывать эффекты связывания ядер, предлагается использовать в качестве альтернативы для ядер с  $Z < 15$  изотопные массы из таблицы масс с поправками на массы электронов и других ядер, рассчитанных по формуле Бете-Вейцкеккера. В коде CORSIKA предполагается, что ядра мишени полностью изолированы, то есть их зарядное состояние  $q$  установлено равным их атомному номеру  $Z$ .

### 1.4. Система координат

Координаты в CORSIKA определены относительно декартовой системы координат с положительной осью  $x$ , указывающей на магнитный север, положительной осью  $y$  на запад и осью  $z$  вверх. Начало системы координат находится на уровне моря. Такое определение позволяет учесть

влияние магнитного поля Земли на параметры моделирования. По умолчанию система координат привязана к городу Карлсруэ ( $49^\circ$  с.ш.,  $8^\circ$  в.д.). Зенитный угол  $\theta$  траектории частицы измеряется между вектором импульса частицы и отрицательной осью  $z$ . Азимутальный углом  $\phi$  между положительной осью  $x$  и  $xy$ -проекцией вектора импульса частицы (то есть относительно севера), отсчитывается против часовой стрелки.

## 1.5. Модель атмосферы

Принятая атмосфера состоит из  $N_2$ ,  $O_2$  и  $Ar$  с объемными долями 78.1%, 21% и 0.9%. Изменение плотности атмосферы с высотой моделируется 5 слоями. Граница атмосферы в этой модели определяется на высоте  $h \approx 112$  км. В четырех нижних слоях зависимость плотности воздуха от высоты описывается экспоненциальной функцией. Это приводит к зависимости между давлением  $T(h)$  в атмосфере и высотой  $h$  в форме

$$T(h) = a_i + b_i e^{-h/c_i} \quad i = 1, \dots, 4.$$

Параметры  $a_i$ ,  $b_i$  и  $c_i$  выбираются таким образом, чтобы функция  $T(h)$  была непрерывной на границах слоя и могла непрерывно дифференцироваться. В коде CORSIKA атмосфера всегда считается плоской. Поэтому при моделировании наклонных, почти горизонтальных, ливней с  $\theta \geq 75^\circ$  влияние кривизны земной поверхности становится заметным. Чтобы избежать длительных расчетов в сферической системе координат аналитическое описание атмосферы может быть заменено табличными распределениями. Таким образом, при моделировании почти горизонтальных ливней с  $\theta = 0$  производится перерасчет в сферической системе координат, но с атмосферным профилем, который присутствует вдоль оси почти горизонтального ливня.

Прохождение первичной частицы через атмосферу начинается с верхней границы атмосферной модели. С этой отправной точки вычисляется место первого взаимодействия. Высота и целевое ядро этого взаимодей-

ствия выбираются случайным образом. При желании оба этих параметра могут быть зафиксированы в конфигурационном файле. Координаты точки первого взаимодействия устанавливаются в  $(0, 0, z_0)$ . На каждом уровне наблюдения координаты  $x$  и  $y$  смещены так, что ось ливня сохраняет координаты  $(0, 0, z_{\text{набл}})$ . Это сделано для облегчения последующего анализа.

## 1.6. Генератор случайных чисел

Методы Монте-Карло, по существу, основаны на использовании случайных чисел, и, следовательно, необходим генератор случайных чисел, который отвечает требованиям современных все более длинных и сложных вычислений. CORSIKA работает с генератором случайных чисел RANMAR в версии, реализованной в программной библиотеке CERN, которая полностью удовлетворяет современным требованиям вычислительной физики. Это генератор псевдослучайных чисел, генерирующий равномерно распределенные числа. Он предлагает возможность генерировать одновременно до  $9 \cdot 10^8$  независимых последовательностей с длиной последовательности  $\approx 2 \cdot 10^{44}$  каждая. Генератор написан на стандартном Фортране и, таким образом, переносим на все типы компьютеров, где получают идентичные по битам результаты. Генератор удовлетворяет самым строгим тестам на случайность и однородность, и при этом работает достаточно быстро.

## 1.7. Пространственное распределение частиц ШАЛ

Известно, что одной и важнейших измеряемых характеристик ШАЛ, является локальная плотность заряженных частиц на различных расстояниях от оси ливня. Для определения различных параметров ливня ученые используют функции пространственного распределения (ФПР) главных компонент ШАЛ. Их надежные теоретические предсказания позволяют определить, например, энергию первичной частицы в широ-

ком радиальном диапазоне расстояний, а также ФПР имеют большое значение для разработки новых проектов экспериментов.

### 1.7.1. Функция пространственного распределения электронов ШАЛ

Когда рассматривают пространственное развитие ливня обычно считают, что на каждом уровне он имеет центр симметрии. Линию, которая соединяет центры симметрии на разных уровнях, называют *осью ливня*. Предполагается, что ось ливня совпадает с направлением движения первичной частицы, вызвавшей ливень. Пространственные характеристики ливня принимают за функции расстояния  $r$  от его оси. Для их описания используют специальные нормировочные единицы измерений, такие как *мольеровские единицы*

$$r_1 = E_s t_0 / \varepsilon \quad \text{и} \quad \theta_1 = E_s / \varepsilon$$

( $t_0$  — радиационная единица длины,  $\varepsilon$  — критическая энергия).

Плотность частиц в ливне на расстоянии  $r$  от оси обозначается  $\rho(r/r_1)$  и получается

$$\rho(r/r_1) = Af(r/r_1) = Af(x), \quad x = r/r_1.$$

$f(x)$  — нормированная функция пространственного распределения, не зависящая от числа частиц в ливне  $N$ . Константа  $A$  определяется из условия, что полное число частиц в ливне равно  $N$ :

$$\int_0^{\infty} \rho(r/r_1) 2\pi dr = Ar_1 \int 2\pi f(x)x dx = N.$$

Полагая, что  $\int 2\pi f(x)x dx = 1$ , находим

$$A = N/r^2, \quad \rho(r/r_1) = (N/r_1^2)f(x).$$

Когда мы рассматриваем частицы ливня на небольших расстояниях от оси их расхождение определяется многократным рассеянием, тогда как на больших расстояниях нужно учитывать однократное рассеяние.



Для аналитического решения каскадных уравнений используется функция пространственного распределения электронов Нишимуры-Каматы-Грейзена (НКГ). Аналитическая аппроксимация вычислений для чистых электромагнитных каскадов имеет вид [15]

$$\rho_e^{\text{НКГ}}(r, s) = \frac{N_e}{r_1^2} \frac{\Gamma(4.5 - s)}{2\pi\Gamma(s)Z(4.5 - 2s)} \left(\frac{r}{r_1}\right)^{s-2} \left(1 + \frac{r}{r_1}\right)^{s-4.5}.$$

$\rho_e(r; s)$  — электронная плотность на расстоянии  $r$  от оси ливня в электромагнитном каскаде с возрастом  $s$ ,  $N_e$  — общее число электронов на уровне наблюдений,  $r_1$  — мольеровская единица ( $\approx 0.25$  радиационной длины в воздухе). Формула НКГ применяется для описания функций пространственного распределения электронов атмосферного ливня.

Впервые кинетические уравнения с учетом рассеяния были составлены Л. Ландау, и решение этих уравнений было выполнено для полного числа частиц в ливне для глубин, соответствующих  $s = 0.6; 1.0; 1.4$ , при  $E_0 \rightarrow \infty$ . Результаты расчетов Нишимуры и Каматы представлены на рис. 4.4.

Пригодная для практики аппроксимация решений Нишимуры и Каматы выглядит так

$$xf(x) = C(s)x^{s-1}(x+1)^{s-4.5}, \quad (1.1)$$

или

$$\rho(r/r_1) = (N/r_1^2)C(s)x^{s-2}(x+1)^{s-4.5}, \quad (1.2)$$

где  $C(s)$  меняется от 0.16 при  $s = 0.5$  до 0.4 при  $s = 1.5$ . Вблизи оси ливня, где  $x \ll 1$ ,  $\rho \sim x^{s-2}$  при  $s < 2$  и  $\rho = \text{const}$  при  $s > 2$ . Выражение утрачивает смысл на больших расстояниях  $r \sim (3 - 4)r_1$  из-за влияния кратного и однократного рассеяния.

При вычислении  $f(x)$  Нишимура и Камата определили  $s$  с учетом зависимости  $s$  от  $r$ . Отсюда соотношение для определения  $s$  можно представить в виде

$$-\lambda_1(s)t = \ln(E_0/E) = \ln(E_0/\varepsilon)(\varepsilon/E_s)(E_s/E) = \ln(E_0/\varepsilon) + \ln(x).$$

Согласно этому соотношению  $s$  возрастает с уменьшением  $r$ , т.е. для частиц высокой энергии, которые движутся близко к оси ливня, максимум числа частиц достигается раньше.

Так как фотоны не рассеиваются кулоновскими силами, то они более сконцентрированы у оси, чем электроны. При  $r \ll 1$  пространственное распределение фотонов описывается

$$\rho_r(r) \approx r^{s-2} \ln(1/r) \text{ при } s < 2; \quad \rho_r(r) = \text{const} \text{ при } s > 2.$$

Видно, что при  $r \rightarrow 0$  возраст  $s$  увеличивается, и наступит момент, когда  $s$  приблизится к 2 и плотность электронов и фотонов почти не будет меняться с изменением расстояния. Такая область расстояний ( $\sim 1$  м) определяет ствол электронно-фотонного ливня.

На данный момент выполнены расчеты для конечного значения  $E_0$ . В этом случае пространственное распределение оказывается более крутым.

Для решения проблемы пространственного распределения частиц на очень больших расстояниях от ствола ливня ( $r > 1$  км) используют методы статистических испытаний (методы Монте-Карло). Это особенно важно для предельно высоких энергий. В данных методах прослеживается судьба каждой частицы ливня, поэтому подобные расчеты требуют огромного машинного времени. Чтобы понять, как запрограммирована формула НКГ, рассмотрим в деталях модуль NKG кода CORSIKA.

### 1.7.2. Модуль NKG кода CORSIKA

В режиме NKG работы кода CORSIKA электромагнитная составляющая ШАЛ рассчитывается аналитическим методом без полного моделирования по методу Монте-Карло [9, 10]. Для уменьшения времени аналитической обработки исследователи жертвуют более точной информацией об электромагнитных частицах. Координаты и время прихода, местоположение и импульсы отдельных электромагнитных частиц не могут быть получены. Дается только общее число электронов на различных

глубинах атмосферы вместе с некоторыми параметрами, которые несут информацию об общем развитии электромагнитной составляющей ливня. На одном или двух уровнях наблюдения поперечные электронные плотности рассчитываются для сетки точек вокруг оси ливня.

### Развитие продольного электромагнитного ливня

Продольное развитие электромагнитной части ливня получают путем вычисления общего числа электронов для значений глубины атмосферы  $\leq 10$ , разделенных на  $100 \text{ г/см}^2$ , до самого низкого уровня наблюдения. Для каждой части ливня, инициируемой гамма-лучами (от  $\pi^0$  или  $\eta$ -распадов) или электронами энергии  $E$ , рассчитывается возраст  $s_i$  этой части ливня на каждом выделенном уровне  $i$  на глубине  $T_i$  (в  $\text{г/см}^2$ )

$$s_i = \frac{3T_i/X_0}{T_i/X_0 + 2 \ln(E/E_{crit})}$$

с  $E_{crit} = 82 \text{ МэВ}$  (критическая энергия) и  $X_0 = 37.1 \text{ г/см}^2$  (длина излучения в воздухе).

Число электронов атмосферного ливня на уровне  $i$  составляет

$$N_{ei}(E_e > 0) = \frac{0.31}{\sqrt{\ln(E/E_{crit})}} e^{(1-1.5 \ln s_i)T_i/X_0}.$$

Для учета энергетического порога (threshold)  $E_{thr}$  для электронов,  $N_{ei}$  умножают на поправочный коэффициент

$$N_{ei}(E_e > E_{thr}) = K N_{ei}(E_e > 0).$$

Поправочный коэффициент  $K$  имеет вид

$$K = N_{ei}(E_e > 0, E_{k2})/N_{ei}(E_e > 0, E_{k1}),$$

который является частным числа электронов, которые получены с различными критическими энергиями  $E_{k1} = 0.4E_{crit}$  и  $E_{k2} = E_{k1} + E_{thr}$ . Этот поправочный коэффициент составляет 4, 10 и 30% для пороговых энергий 1, 3 и 10 МэВ. При каждом значении глубины эти электронные числа  $N_{ei}$  суммируются для всех частей ливня.

## Продольный возрастной параметр

Чтобы описать развитие потока общего электромагнитного или адронного каскада так же, как параметр  $s$  для отдельных электромагнитных частей ливня, вводится искусственный параметр, глобальный продольный возраст  $s_{long}$ . Используя параметр возраста  $s$ , определенный в соответствии с уравнением, вычисляются параметры  $a(s)$ ,  $b(s)$ ,  $C_1(s)$  и  $C_2(s)$  структурных функций Нишимуры-Каматы

$$a(s) = \frac{4}{s} e^{0.915(s-1)}$$

$$b(s) = 0.15 + \frac{1}{1+s}$$

$$C_1(s) = \frac{a^{s/b}}{2\pi} \left( \Gamma\left(\frac{s}{b}\right) + \frac{4\Gamma\left(\frac{s+1}{b}\right)}{sa^{1/b}} \right)^{-1}$$

$$C_2(s) = \frac{a^{(s+1)/b}}{2\pi} \left( \Gamma\left(\frac{s+1}{b}\right) + \frac{4\Gamma\left(\frac{s+2}{b}\right)}{sa^{1/b}} \right)^{-1}.$$

Учитывая отношение коэффициентов  $C_1(s)/C_2(s)$  параметр  $R$  на каждой глубине определяется путем суммирования по всем частям ливня  $j$

$$R = \frac{\sum_j (N_j C_1(s)/C_2(s))}{\sum_j N_j}$$

с электронными числами  $N_j$ .

Наконец,  $s_{long}$  определяется как

$$s_{long} = \frac{\sqrt{B^2 - 4A(C - R) - B}}{2A}.$$

В этом соотношении коэффициенты  $A$ ,  $B$  и  $C$  зависят от  $R$  и приведены в таблице 1.1.

## Поперечное распределение электронов

Поперечное распределение электромагнитных ливней в разных материалах хорошо масштабируется радиусом Мольера  $r_{mol} = 0.0212 \text{ГэВ} \cdot \xi_0 / E_{crit}$ . Здесь  $\xi_0$  — радиационная длина в см.

Таблица 1.1

Параметры для расчета продольного возраста ливня

Диапазон $R$	$A$	$B$	$C$
0.0191 ÷ 0.1796	0.3109	0.2146	-0.0055
0.1796 ÷ 0.5364	0.3667	0.1639	0.0060
0.5364 ÷ 1.0332	0.1460	0.6317	-0.2420
1.0332 ÷ 1.4856	-0.3376	2.0903	-1.3438

В атмосфере  $\xi_0$  изменяется с плотностью, следовательно,  $r_{mol} = 9.6\text{г/см}^2$  воздуха. Около 90% энергии ливня откладывается внутри цилиндра вокруг оси ливня с радиусом  $r_{mol}$ . В CORSIKA распределение электронов определяется для двух самых низких уровней наблюдения. Плотность электронов  $\rho_e$  на расстоянии  $r$  от оси определенной части ливня рассчитывается в соответствии с (1.1) и/или (1.2) по формуле

$$\rho_e = \frac{N_e}{2\pi r_{mol}^2 s_m^2} \frac{\Gamma(4.5 - s)}{\Gamma(s)\Gamma(4.5 - 2s)} \left( \frac{r}{r_{mol}s_m} \right)^{s-2} \left( 1 + \frac{r}{r_{mol}s_m} \right)^{s-4.5}$$

с функцией модуляции Лагутина

$$s_m = 0.78 - 0.21s.$$

Плотности электронов рассчитываются для 80 опорных точек, центрированных вокруг оси ливня на круговой решетке, простирающейся в 8 направлениях, разнесенных на  $45^\circ$ , и на 10 радиальных расстояний в каждом направлении, охватывающих диапазон от 1 м до максимального радиуса, который должен быть указан в логарифмическом масштабе. Известно о том, что уравнение является правильным только в приближении Ландау, которое ограничивает (помимо других) расстояние  $r$  между рассматриваемой точкой сетки и осью части ливня

$$\left| \frac{r}{r_{mol}} \right| > \left| \frac{E_{crit}}{E} \right|.$$

Это условие нарушается, когда ось части ливня приближается к одной из точек сетки. Плотности всех частей ливня суммируются в каждой контрольной точке сетки, чтобы получить локальные плотности общего ливня.

### 1.7.3. Код модуля NKG

Объявляется подпрограмма,

```
SUBROUTINE NKG( ENERN )
```

и первое что мы видим это ее аргумент *ENERN* — энергия электрона/гамма излучения, вызвавшего атмосферный ливень (ГэВ). Имеет отрицательный знак для вычитания после фотоядерной реакции.

Далее определяются: тип переменных, внешние функции и известные константы.

```
DOUBLE PRECISION AE, AS, ASE, AUXIL, BS, CCP, CPC, CPCP, CPH, CSGA,
*           DE, DISTL, ECRI, ECR1, ECR2, ENERN, GAM, GRCUT,
*           G1, G2, G3, S, SC1, SC2, SIGNE, SM, SMRM,
*           SQRZ1I, SQZC1I, SQZC2I, SS2, SS45, TEX, THICK, THICKP,
*           XMOL, XNE, XS, X0, YM, YS, ZC1, ZC2, ZG1, ZG2, ZG3, Z1
INTEGER     IL, IOL, M
SAVE
EXTERNAL    GAM, THICK
DATA        X0 / 36.66D0 /, GRCUT / 0.1D0 /, ECRI / 0.086D0 /
DATA        ECR2 / 0.0344D0 /
```

*X0* — радиационная длина в воздухе ( $\text{г}/\text{см}^2$ ). *GRCUT* — порог Грейзена, *ECRI* - критическая энергия в воздухе. *ECR2* это  $0.4 \cdot ECRI$ .

Проверяется знак энергии электрона.

```
IF ( ENERN .GE. 0.D0 ) THEN
    SIGNE = +1.D0
```

ELSE

ENERN = -ENERN

SIGNE = -1.D0

ENDIF

Отсеиваются частицы, энергия которых выше порога Грейзена. Электромагнитная частица ниже этого среза не может инициировать ливень.

IF ( ENERN .LT. GRCUT ) RETURN

Не нужно проводить вычисления для частиц, идущих в обратном направлении.

IF ( SECPAR(2) .LE. 0.D0 ) RETURN

Частицы, находящиеся ниже наименьшего уровня наблюдения, также не интересуют.

IF ( SECPAR(5) .LT. OBSATI(1) ) RETURN

Z1 = LOG( ENERN / ECRI )

SQRZ1I = 1.D0 / SQRT( Z1 )

Этот срез важен только для  $ELCUT > 0.0672$ .

ECR1 = ECR2 + ELCUT(3)

IF ( ENERN .LT. ECR1 ) RETURN

ZC1 = LOG( ENERN / ECR1 )

SQZC1I = 1.D0 / SQRT( ZC1 )

$LOG(ENERN/ECR2)$  это  $LOG(ENERN/ECRI) - LOG(0.4)$ .

ZC2 = Z1 + 0.916290732D0

SQZC2I = 1.D0 / SQRT( ZC2 )

THICKP = THICK( SECPAR(5) )

Цикл по уровням.

```
DO 14 IL = 1, IALT(1)
```

Пренебрегаем уровнями над частицей.

```
IF ( TLEVCM(IL) .GT. SECPAR(5) ) GOTO 14
```

*XMOL* — глубина в длинах излучения.

```
XMOL = (TLEV(IL) - THICKP) / ( X0 * SECPAR(2) )
```

```
IF ( SECPAR(0) .NE. 1.D0 ) XMOL = XMOL + 0.6D0
```

```
IF ( XMOL .GT. 60.D0 .OR. XMOL .LT. 1.D0 ) GOTO 14
```

*S* — параметр возраста.

```
S = 3.D0 * XMOL / (XMOL + 2.D0 * Z1)
```

```
IF ( S .LE. 0.2D0 ) GOTO 14
```

```
SC1 = 3.D0 * XMOL / (XMOL + 2.D0 * ZC1)
```

```
SC2 = 3.D0 * XMOL / (XMOL + 2.D0 * ZC2)
```

Число электронов на наблюдаемом уровне.

```
CPH = .31D0 * EXP( XMOL * ( 1.D0 - 1.5D0 * LOG(S) ) ) * SQRZ1I
```

```
CPC = EXP( XMOL * ( 1.D0 - 1.5D0 * LOG( SC1 ) ) ) * SQZC1I
```

```
CCP = EXP( XMOL * ( 1.D0 - 1.5D0 * LOG( SC2 ) ) ) * SQZC2I
```

```
#if __THIN__
```

```
CPCP = SIGNE * SECPAR(13) * CPH * CPC / CCP
```

```
#else
```

```
CPCP = SIGNE * CPH * CPC / CCP
```

```
#endif
```

Промежуточные выкладки для радиального распределения и параметра возраста.



```

AE = 4.D0 * EXP( 0.915D0 * (S - 1.D0) ) / S
DE = ( 1.D0 + S ) / ( 1.15D0 + 0.15D0 * S )
ASE = AE**DE
ZG3 = GAM( (S + 2.D0) * DE )
IF ( ZG3 .LE. 0.D0 ) GOTO 14
ZG1 = GAM(S * DE)
ZG2 = GAM( (S + 1.D0) * DE )
AUXIL = 4.D0 / (S * ASE)
XNE = CPCP * ( ZG2 + AUXIL * ZG3 ) / ( ASE * (ZG1 + AUXIL*ZG2) )

```

Сумма  $N_E$  на фиксированном уровне.

```

ZNE(IL) = ZNE(IL) + XNE
SL(IL) = SL(IL) + CPCP

```

Радиальное распределение электронов будет вычисляться на двух выбранных наблюдаемых уровнях.

```

IF ( IL .EQ. IALT(1) ) THEN
    IOL = 1
ELSEIF ( IL .EQ. IALT(2) ) THEN
    IOL = 2
ELSE
    GOTO 14
ENDIF

```

Вычисление радиального распределения электронов.

```

IF ( SC1 .GE. 2.25D0 ) GOTO 14
G1 = GAM(4.5D0 - SC1)
G2 = GAM(SC1)
G3 = GAM(4.5D0 - 2.D0 * SC1)

```

Расстояние (в см) между уровнем, на котором образуется вторичная частица, и наблюдаемым уровнем.

$$\text{DISTL} = \text{SECPAR}(5) - \text{TLEVCM}(\text{IL})$$

Модуляция по возрастному параметру Лагутина-Учайкина (параметр возраста лежит в диапазоне  $0.2 \div 2.25$ ).

$$\text{SM} = 0.78\text{D0} - 0.21\text{D0} * \text{SC1}$$

$$\text{SMRM} = 1.\text{D0} / ( \text{SM} * \text{RMOL}(\text{IOL}) )$$

$$\text{CSGA} = \text{CPCP} * \text{SMRM}^{**2} * \text{G1} / ( \text{PI2} * \text{G2} * \text{G3} )$$

$$\text{SS2} = \text{SC1} - 2.\text{D0}$$

$$\text{SS45} = \text{SC1} - 4.5\text{D0}$$

$$\text{AS} = \text{SECPAR}(3)$$

$$\text{BS} = \text{SECPAR}(4)$$

$$\text{TEX} = \text{DISTL} / \text{SECPAR}(2)$$

Расстояние до центра каскада (в см):

$$\text{XS} = \text{SECPAR}(7) + \text{TEX} * \text{AS} - \text{XOFF}(\text{NOBSLV}+1-\text{IOL})$$

$$\text{YS} = \text{SECPAR}(8) + \text{TEX} * \text{BS} - \text{YOFF}(\text{NOBSLV}+1-\text{IOL})$$

### Формула НКГ

Цикл по всем радиальным расстояниям для получения плотности в мольеровских единицах измерения.

$$\text{D0 171 M} = -10, 10$$

$$\text{IF ( M .EQ. 0 ) GOTO 171}$$

В направлении X.

$$\text{YM} = \text{SMRM} * \text{MAX}( 1.\text{D0}, \text{SQRT}( (\text{DISX}(\text{M})-\text{XS})^{**2} + \text{YS}^{**2} ) )$$

$$\text{CZX (M, IOL)} = \text{CZX (M, IOL)} + \text{CSGA} * \text{YM}^{**\text{SS2}} * (\text{YM}+1.\text{D0})^{**\text{SS45}}$$

В направлении Y.

```
YM = SMRM * MAX( 1.DO, SQRT( XS**2 + (DISY(M)-YS)**2 ) )
CZY (M, IOL) = CZY (M, IOL) + CSGA * YM**SS2 * (YM+1.DO)**SS45
```

В направлении XY.

```
YM = SMRM *
* MAX( 1.DO, SQRT((DISXY(M,1)-XS)**2 + (DISXY(M,2)-YS)**2) )
CZXY(M, IOL) = CZXY(M, IOL) + CSGA * YM**SS2 * (YM+1.DO)**SS45
```

В направлении YX.

```
YM = SMRM *
* MAX( 1.DO, SQRT((DISYX(M,1)-XS)**2 + (DISYX(M,2)-YS)**2) )
CZYX(M, IOL) = CZYX(M, IOL) + CSGA * YM**SS2 * (YM+1.DO)**SS45
```

```
171 CONTINUE
```

```
14 CONTINUE
```

```
RETURN
```

```
END
```

## 1.8. Результаты главы

- Изучена структуры программного комплекса CORSIKA.
- Выполнена конфигурация кода для проведения расчетов функции пространственного распределения (ФПР) электронов в двух режимах: с использованием приближенного аналитического решения НКГ и прямым моделированием с использованием модуля EGS4.

Главным результатом главы является полностью сконфигурированная и настроенная для проведения расчетов рабочая среда, включающая исполняемые файлы кода CORSIKA, а также интегрированные с пакетом модели ядерных взаимодействий при высоких энергиях.

## Глава 2

# Модификация и расчет температурных коэффициентов

В главе предлагается альтернативный подход к описанию ФПР электронов, основанный на использовании скейлингового формализма, предложенного в АлтГУ. Для описания температурного эффекта используются результаты функциональной теории чувствительности, также созданной в АлтГУ. Проводится модификации модуля НКГ кода CORSIKA. Выполнены расчеты температурных коэффициентов.

### 2.1. Опция НКГ кода CORSIKA

Известно, что основным источником электромагнитной компоненты ШАЛ является распад  $\pi^0$  мезона

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma \Rightarrow \text{ЭФК.}$$

Представим, что в результате распада в атмосфере образовался гамма-квант. Каскад вторичных частиц от этого гамма-кванта можно смоделировать явно и на некотором уровне наблюдения посчитать, например, плотность числа электронов на разных расстояниях от оси ливня (радиальное распределение).

В опции НКГ кода CORSIKA мы заменяем моделирование ЭФК от первичного электрона на моделирование ЭФК от первичного фотона, за счет увеличения длины развития каскада на 0.6 рад.ед.

Как было сказано ранее, радиальное распределение электронов в ЭФК

задается формулой Нишимуры-Каматы-Грейзена (1.1).

Группой А. А. Лагутина было показано, что функция пространственного распределения электронов ЭФК от первичного фотона в неоднородной атмосфере хорошо описывается соотношением [16–19]

$$r f(r, E, s; t_{\text{наб}}) = \frac{x f(x)}{r_{\text{с.к.}}(E, s; t_{\text{наб}})}, \quad x = \frac{r}{r_{\text{с.к.}}} \quad (2.1)$$

где

$$x f(x) = \exp\{-3.63 - 1.89 \ln x - 0.370 \ln^2 x - 0.0168 \ln^3 x\}.$$

$$\begin{aligned} r_{\text{с.к.}}(E, s; t_{\text{наб}}) &= \frac{\eta \rho_0}{\rho_{\text{наб}}} r_{\text{с.к.}}^{\text{одн}} = \frac{\eta \rho_0}{\rho_{\text{наб}}} 296 \times \\ &\times \exp\{-3.69 + 0.0505 \ln E - 0.00175 \ln^2 E + \\ &+ s [1.81 + 0.00638 \ln E - 0.0826 / \ln E]\}, \text{ м,} \quad (2.2) \end{aligned}$$

$\rho_0 = 1.22 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup> — плотность воздуха в однородной атмосфере,  $\rho_{\text{наб}}$  — плотность воздуха на уровне наблюдения  $t_{\text{наб}}$  в рассматриваемой атмосфере.

Масштабный множитель  $\eta$  характеризует неоднородность атмосферы. База данных температурных коэффициентов  $\eta$  пространственного распределения электронов в электромагнитных каскадах получена в Алтайском государственном университете ранее путем решения сопряженных уравнений для вариационных производных распределений частиц в ЭФК.

## 2.2. Вариации температурного профиля атмосферы

Подход с использованием выражений (2.1) и (2.2) позволяет учесть влияние вариаций параметров атмосферы на распределение электронов ШАЛ.

Свойства атмосферы, в которой происходит развитие ШАЛ, постоянно изменяются. Очевидно, например, что вариации температурного профиля напрямую могут повлиять на форму ФПР электронов ЭФК.

Будем исследовать чувствительность характеристик ЭФК к возмущениям в атмосфере, происходящим на различных атмосферных уровнях  $t_{1i}$  рад. ед.

Решение поставленной задачи будем искать в рамках функциональной теории чувствительности, созданной в Алтайском государственном университете [20].

При изучении влияния вариаций температурного профиля  $\Delta T(t)$  атмосферы на характеристики ШАЛ задача разделяется на две [21]:

1. расчет функции пространственного распределения  $\bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot))$  частиц ливня на уровне  $t$ , порожденного первичной частицей типа  $i$  энергии  $E$ , при невозмущенном состоянии атмосферы  $T(t)$ ,
2. нахождение чувствительности этого распределения  $\Delta \bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot) \rightarrow T(\cdot) + \Delta T(\cdot))$  к изменениям температурного профиля  $T(t) \rightarrow T(t) + \Delta T(t)$ .

Переменная  $T(\cdot)$  в аргументе этих функций отражает зависимость значения соответствующего функционала от всего профиля температуры атмосферы.

Если функции  $\bar{N}_i$  и  $\Delta \bar{N}_i$  известны, то пространственные характеристики ШАЛ при некотором распределении температуры  $T(t) + \Delta T(t)$  могут находиться с использованием равенства  $\bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot) + \Delta T(\cdot)) = \bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot)) + \Delta \bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot) \rightarrow T(\cdot) + \Delta T(\cdot))$ .

Чувствительность пространственного распределения частиц ливня  $\Delta \bar{N}_i$  к изменениям температурного профиля на уровнях атмосферы  $t_1$  может быть представлена в виде [20, 21]

$$\Delta \bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot) \rightarrow T(\cdot) + \Delta T(\cdot)) \approx \int \frac{\delta \bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot))}{\delta T(t_1) dt_1} \Delta T(t_1) dt_1. \quad (2.3)$$

Используя (2.3), получаем, что для расчета пространственных характеристик ШАЛ в атмосфере, температурный профиль  $T(t)$  которой изменяется на  $\Delta T(t)$ , достаточно знать пространственные характеристики при некотором невозмущенном температурном профиле  $\overline{N}_i(r, E, t; T(\cdot))$  и соответствующие коэффициенты дифференциальной чувствительности  $\overline{N}_i^{(1)}(r, E, t; t_1, T(\cdot)) = \delta \overline{N}_i(r, E, t; T(\cdot)) / \delta T(t_1) dt_1$ , вызванные вариациями температуры атмосферы на различных уровнях  $t_1$ .

Наличие аналитических выражений для описания характеристик изотермической атмосферы позволяет провести расчеты дифференциальных температурных коэффициентов ФПР электронов широких атмосферных ливней  $\overline{N}_i^{(1)}(r, E, t; t_1, T(\cdot))$  и нормированных температурных коэффициентов  $\alpha_i^T$ ,

$$\alpha_i^T(r, E, t; t_1) = \frac{\overline{N}_i^{(1)}(r, E, t; t_1, T(\cdot))}{\overline{N}_i(r, E, t; T(\cdot))}. \quad (2.4)$$

### 2.3. Модификация модуля НКГ

Для исследования температурного эффекта пространственного распределения электронной компоненты ШАЛ я модифицировал модуль НКГ расчета радиального распределения электронов ШАЛ вычислительного комплекса CORSIKA v7.6400. При этих расчетах использовалась база данных температурных коэффициентов, о которой было сказано выше. Эта база содержит значения коэффициентов  $\eta$  в виде четырехмерных массивов данных для 30 значений расстояний от оси ливня  $r = 1 - 1500$  м, 9 значений энергии первичного фотона  $E = 10^4 - 10^{12}$  МэВ, 27 значений параметров возраста ливня  $s$ , соответствующих глубинам в атмосфере  $t = 4.5 - 28.0$  рад. ед., и 22 значений уровня возмущения  $t_1$ .

Главным элементом модернизированной версии вычислительного комплекса CORSIKA является использование разработанного в Алтайском государственном университете скейлингового формализма [16–19] для

описания пространственного распределения электронов в парциальных электронно-фотонных каскадах, которые формируют электронную компоненту ШАЛ.

Модернизация вычислительного комплекса CORSIKA состояла из четырех основных операций:

1) Определение в главном файле `src/corsika.h` новых массивов `CZX_T`, `CZY_T`, `CZXY_T` и `CZYX_T`, содержащих коэффициенты дифференциальной чувствительности (вариационные производные) для индивидуальных ШАЛ, и объявление для них области с общей памятью (т.н. COMMON-блоки) с именем `CRNKGI_T`. Определение новых массивов `DLAX_T`, `DLAY_T`, `DLAXY_T` и `DLAYX_T`, содержащих усредненные значения коэффициентов дифференциальной чувствительности, и объявление для них области с общей памятью с именем `CRNKGS_T`. Индекс `_T` в названиях используется для того чтобы показать, что эти массивы содержат данные с учетом поправок на температурные эффекты. Экстенды новых массивов по каждому измерению составляют `(-10:10, 1:2, 1:22)`. Здесь первые два измерения — стандартные для кода CORSIKA, а третье измерение введено для хранения данных для каждого из 22 уровней возмущения.

2) Модернизация подпрограммы `NKG`.

В разделе описания подпрограммы подключаем блоки описания новых массивов, определенные в файле `src/corsika.h`

```
#define __NKGIINC_T__
```

```
#define __NKGSINC_T__
```

Чтобы получить числовые значения температурных коэффициентов пространственного распределения электронов в электромагнитных кас-



кадах из созданной базы данных была написана отдельная подпрограмма, которая вызывается при каждой новой инициализации подпрограммы NKG. Так как процедура чтения данных из файлов достаточно медленная, многократное ее повторение приводит к существенному увеличению времени расчетов. Для решения этой проблемы в описании четырехмерного массива, содержащего коэффициенты, используется специальный атрибут `save`, позволяющий сохранять в оперативной памяти значения всех элементов массива, для повторного их использования при следующей инициализации подпрограммы NKG.

Ниже показана структура кода, реализующего данную часть алгоритма.

```

logical, save :: flag = .true.  !Флаг, управляющий количеством
                                !инициализаций подпрограммы
                                !чтения базы данных.

integer, parameter :: nt1 = 22  !Количество уровней
                                !возмущения t1=0-15рад.ед.

integer, parameter :: ne = 9    !Количество уровней
                                !энергии E=10-109 ГэВ.

integer, parameter :: ns = 27   !Количество параметров
                                !возраста ливня s.

integer, parameter :: nr = 30   !Количество расстояний от
                                !оси ливня r=1-1500 м.

real(kind=8), dimension (1:ne,1:ns,1:nr,1:nt1), save ::coeff_saved

```

...

```
if(flag) then  !Если база коэффициентов считывается первый раз

    !Вызов подпрограммы для получения числовых значений
    !температурных коэффициентов пространственного
    !распределения электронов в электромагнитных каскадах и
    !запись этих коэффициентов в четырехмерный массив

    call read_coeff(fname,e_gamma,t_gamma,r_fix,coeff_saved)

end if
```

```
flag=.false.  !Флаг указывает, что базу при последующих вызовах
               !подпрограммы NKG больше считывать не нужно
```

Далее в подпрограмме NKG операторы для вычисления среднеквадратичного радиуса и плотности числа частиц заменяются на выражения (2.2) и (2.1), соответственно. После этого для данной энергии фотона  $E$  и для данного параметра возраста  $s$  проводится интерполяция четырехмерных массивов температурных коэффициентов для всех расстояний от оси ливня  $r$  и для всех уровней возмущения  $t_1$ . В качестве интерполянтов используются полиномы Лагранжа третьей степени. В расчетах мы считаем, что, если первичный фотон рождается ниже уровня возмущения или его энергия  $E < 10$  ГэВ, то температурными эффектами для него пренебрегаем.

Полученные в результате интерполяции значения используются для вычисления коэффициентов дифференциальной чувствительности (мас-

сивов CZX\_T, CZY\_T, CZXY\_T и CZYX\_T). Ниже показан фрагмент кода с обозначениями переменных, введенными разработчиками кода CORSIKA для расчета пространственного распределения электронов при невозмущенном температурном профиле, и новыми обозначениями, введенными нами для расчета коэффициентов дифференциальной чувствительности.

```

DO M = -10, 10
  IF ( M == 0 ) CYCLE

! Направление вдоль оси X

  YM = MAX(1.D0, SQRT((DISX(M)-XS)**2 + YS**2))/RMS

  EFK = ... формула

  CZX (M, IOL) = CZX (M, IOL) + EFK !Пространственное
                                     !распределение электронов ШАЛ

  do number_t1 = 1, nt1 !Цикл по числу уровней возмущения

    CZX_T (M, IOL, number_t1) = CZX_T (M, IOL, number_t1)+EFK*&
    TEMP_COEFF_X(M, IOL, number_t1) !Интерполированные значения
                                     !температурных коэффициентов

  end do

  ...

END DO

```

- 3) Значения коэффициентов дифференциальной чувствительности CZX\_T, CZY\_T, CZXY\_T и CZYX\_T вместе с массивами, содержащими пространственное распределение электронов ШАЛ при невозмущенном температурном профиле CZX, CZY, CZXY и CZYX, передаются через область с общей памятью в подпрограмму AVAGE. Здесь происходит суммирование вкладов от отдельных ШАЛ.

```
DO NUMBER_T1 = 1, 22
  DO K = 1, 2
    IF ( OBSATI(K) .GE. 0.DO ) THEN
      DO ID = -10, 10
        DLAX_T (ID,K,NUMBER_T1) = DLAX_T (ID,K,NUMBER_T1) + &
          CZX_T (ID,K,NUMBER_T1)
        DLAY_T (ID,K,NUMBER_T1) = DLAY_T (ID,K,NUMBER_T1) + &
          CZY_T (ID,K,NUMBER_T1)
        DLAXY_T(ID,K,NUMBER_T1) = DLAXY_T(ID,K,NUMBER_T1) + &
          CZXY_T(ID,K,NUMBER_T1)
        DLAYX_T(ID,K,NUMBER_T1) = DLAYX_T(ID,K,NUMBER_T1) + &
          CZYX_T(ID,K,NUMBER_T1)
      END DO
    END IF
  END DO
END DO
```

Далее массивы DLAX\_T, DLAY\_T, DLAXY\_T и DLAYX\_T передаются через область с общей памятью в подпрограмму MITAGE.

- 4) Подпрограмма MITAGE служит для усреднения данных и вывода их на стандартный вывод.

Процедура усреднения простая и ничем не отличается от стандартного кода CORSIKA.

```

DO NUMBER_T1 = 1, 22
DO K = 1, 2
IF ( OBSATI(K) .GE. 0.DO ) THEN
DO ID = -10, 10
DLAX_T (ID,K,NUMBER_T1) = DLAX_T (ID,K,NUMBER_T1) * RISH
DLAY_T (ID,K,NUMBER_T1) = DLAY_T (ID,K,NUMBER_T1) * RISH
DLAXY_T(ID,K,NUMBER_T1) = DLAXY_T(ID,K,NUMBER_T1) * RISH
DLAYX_T(ID,K,NUMBER_T1) = DLAYX_T(ID,K,NUMBER_T1) * RISH
END DO
END IF
END DO
END DO

```

В итоге получаем средние значения коэффициентов дифференциальной чувствительности. Вывод этих значений на стандартный вывод организован в виде четырех циклов, согласно геометрической модели кода CORSIKA (ниже показан фрагмент, содержащий только один цикл).

```

do i = -10, 10
WRITE(MONIOU,608) (DLAX_T(I,K,number_t1), number_t1=1,22)
end do
...

```

На завершающем этапе для вычисления дифференциальных температурных коэффициентов электронной компоненты ШАЛ нужно провести усреднение полученных коэффициентов дифференциальной чувствительности и пространственных распределений электронов по радиальной переменной и найти их отношение.

В итоге, проведенная модификация модуля НКГ расчета радиального распределения электронов ШАЛ вычислительного комплекса CORSIKA позволила описать не только пространственное распределение электронной компоненты в парциальных электронно-фотонных каскадах от гамма-квантов, но и их вариационные производные, т.е. дифференциальные температурные коэффициенты.

## 2.4. Анализ результатов

Результаты расчетов температурных коэффициентов электронной компоненты ШАЛ, инициированных первичными протонами ( $i = p$ ) и ядрами железа ( $i = \text{Fe}$ ), показаны на рисунках 2.1–2.6.

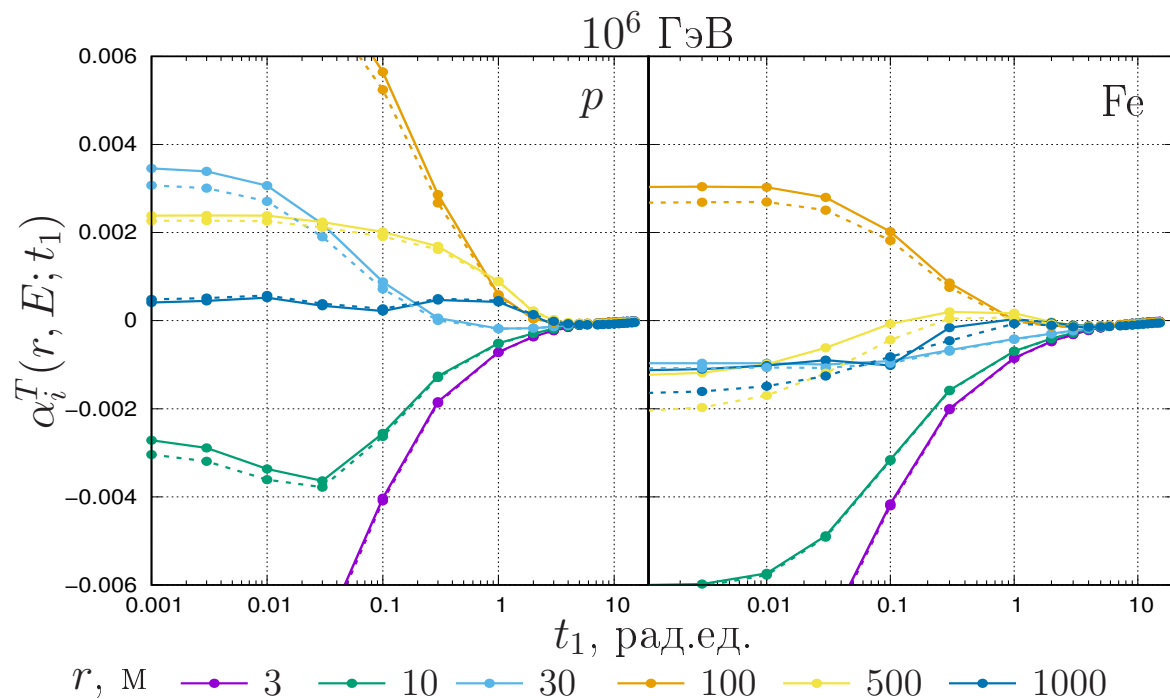


Рис. 2.1. Температурные коэффициенты электронной компоненты ШАЛ в зависимости от уровня возмущения  $t_1$  для разных расстояний от оси ливня для энергии первичной частицы  $E = 10^6$  ГэВ. ШАЛ инициированы первичными протонами ( $i = p$ ) и ядрами железа ( $i = \text{Fe}$ ). Сплошные линии соответствуют распределениям, полученным в изотермической модели атмосферы, пунктирные — американская стандартная модель

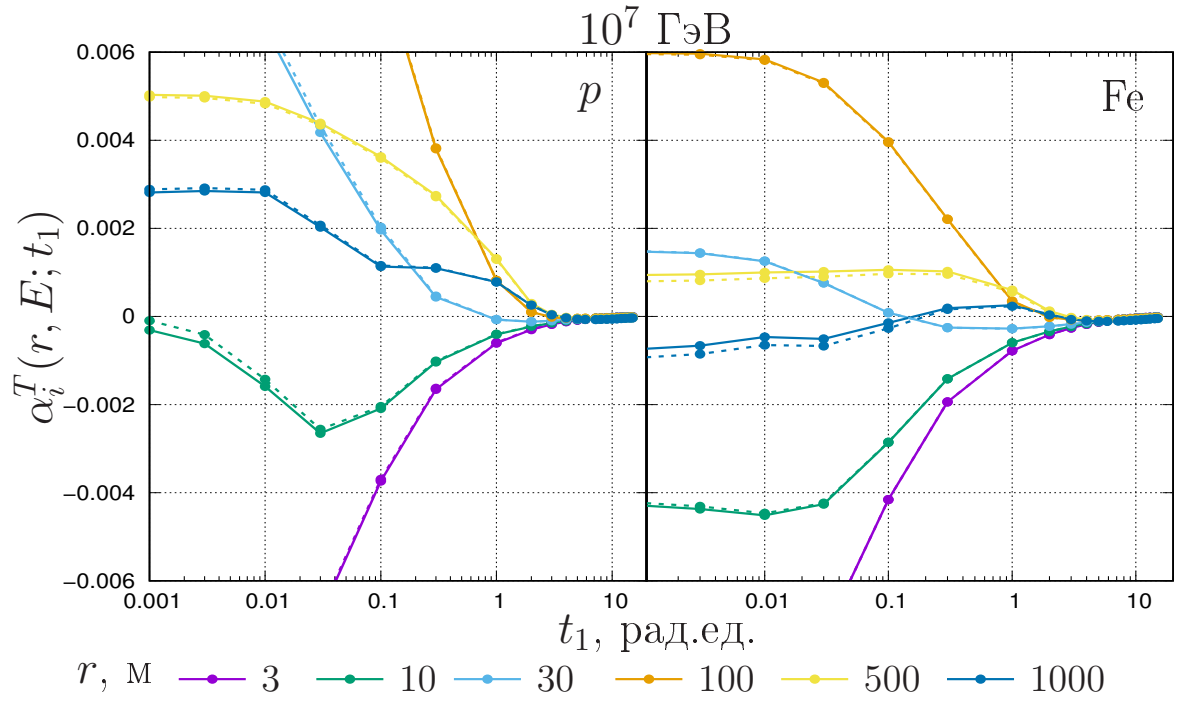


Рис. 2.2. Температурные коэффициенты электронной компоненты ШАЛ в зависимости от уровня возмущения  $t_1$  для разных расстояний от оси ливня для энергии первичной частицы  $E = 10^7$  ГэВ. Обозначения как на рисунке 2.1

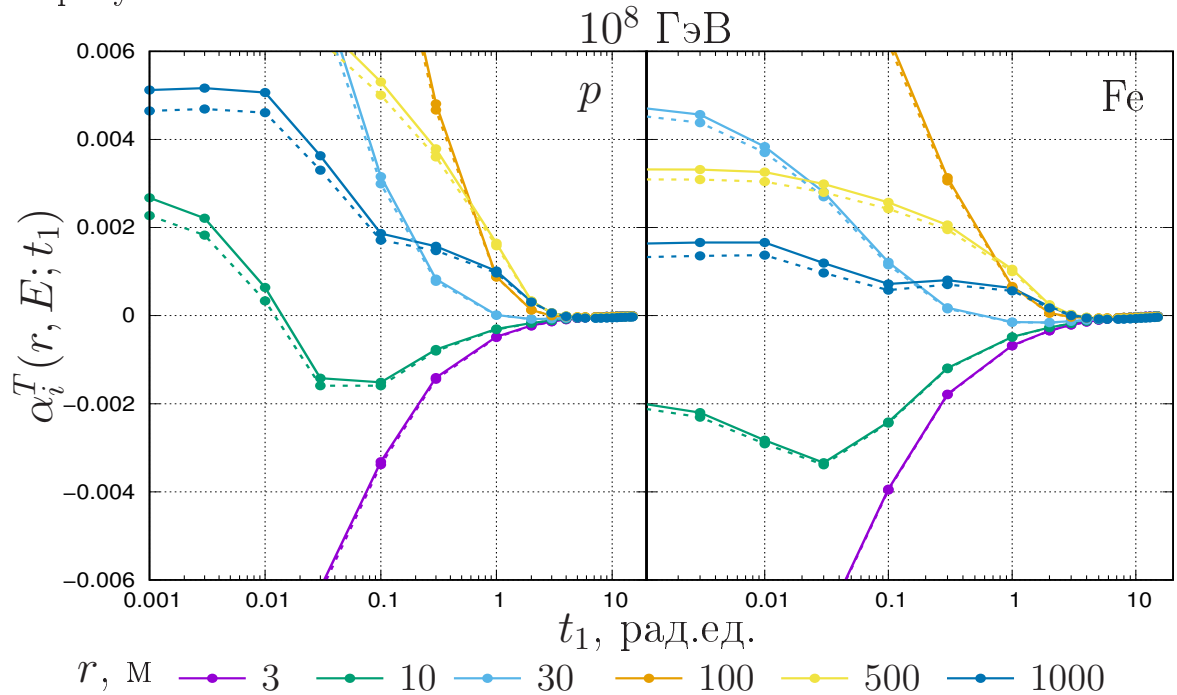


Рис. 2.3. Температурные коэффициенты электронной компоненты ШАЛ в зависимости от уровня возмущения  $t_1$  для разных расстояний от оси ливня для энергии первичной частицы  $E = 10^8$  ГэВ. Обозначения как на рисунке 2.1

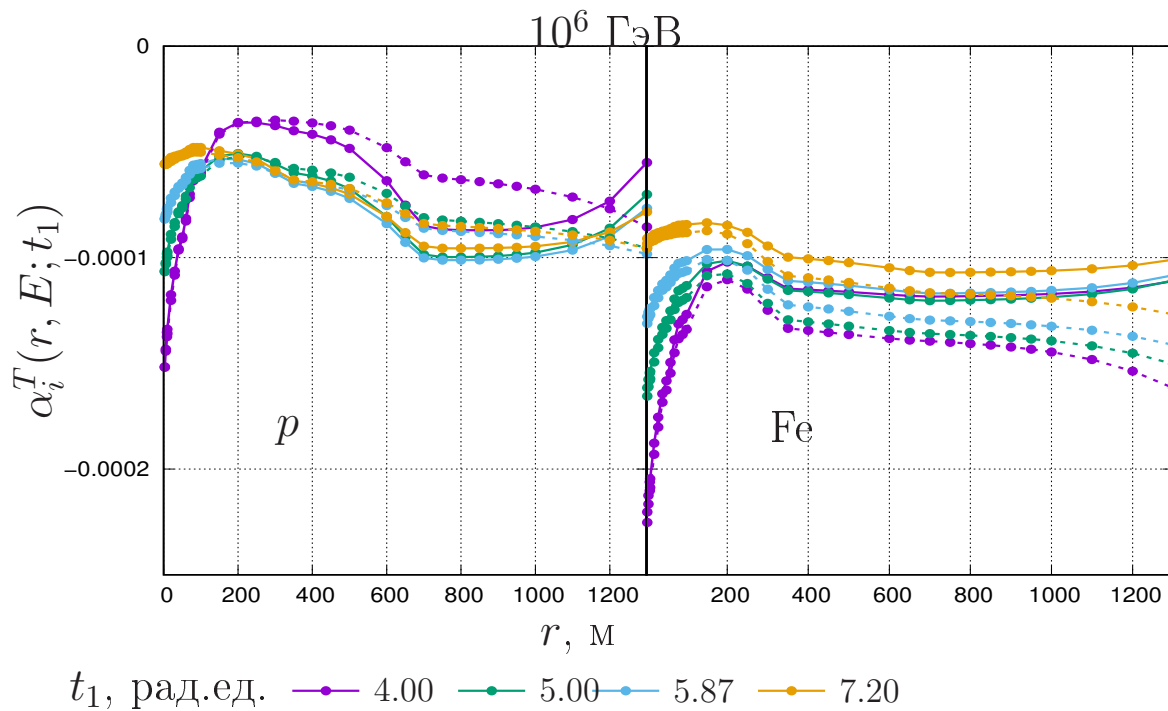


Рис. 2.4. Температурные коэффициенты электронной компоненты ШАЛ в зависимости от расстояния от оси ливня при разных уровнях возмущения  $t_1$  для энергий первичной частицы  $E = 10^6$  ГэВ. Обозначения как на рисунке 2.1

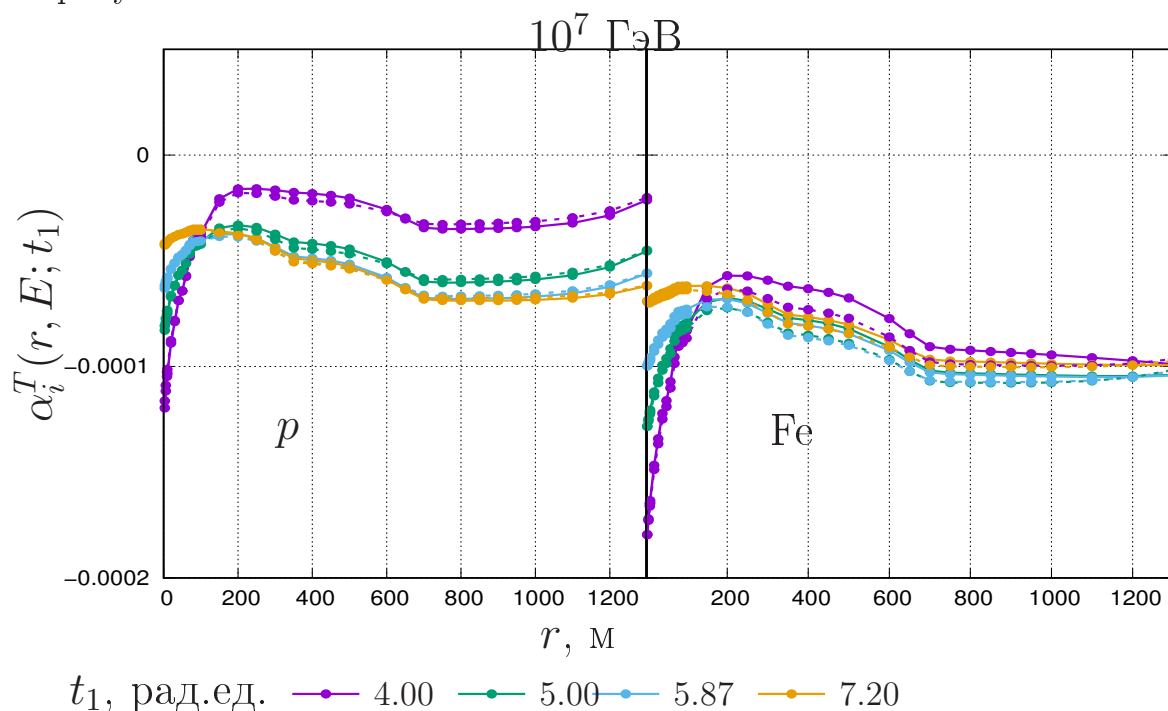


Рис. 2.5. Температурные коэффициенты электронной компоненты ШАЛ в зависимости от расстояния от оси ливня при разных уровнях возмущения  $t_1$  для энергий первичной частицы  $E = 10^7$  ГэВ. Обозначения как на рисунке 2.1



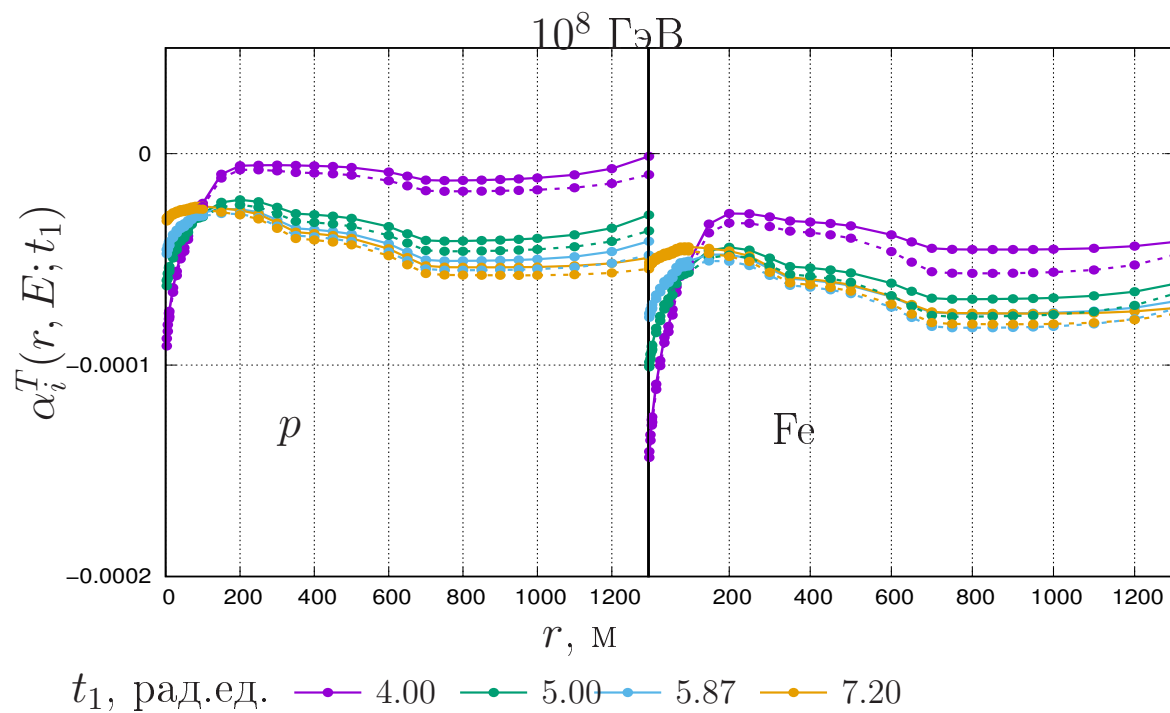


Рис. 2.6. Температурные коэффициенты электронной компоненты ШАЛ в зависимости от расстояния от оси ливня при разных уровнях возмущения  $t_1$  для энергий первичной частицы  $E = 10^8 \text{ ГэВ}$ . Обозначения как на рисунке 2.1

Анализ графических данных приводит к следующим выводам:

- изменение температуры на один градус в слое в одну радиационную единицу приводит к изменению ФПР на  $(0.2 - 0.6)\%$  при возмущениях атмосферы в приземном слое  $t_1 \approx (0 \div 0.03)$  рад. ед. и  $0.06\%$  — для  $t_1 \approx 4$  рад. ед.;
- увеличение температуры атмосферы приводит к уменьшению плотности частиц в области  $r \leq (10 - 20)$  м и ее росту — при  $r > 40$  м. В области  $r \approx (20 - 40)$  м температурный эффект ФПР электронов минимален.

## 2.5. Результаты главы

- Проведена модификация блока НКГ кода CORSIKA для расчета температурных коэффициентов электронной компоненты ШАЛ.
- Выполнена отладка и настройка модифицированного кода.
- Рассчитаны нормированные температурные коэффициенты электронной компоненты ШАЛ для изотермической модели атмосферы и модели US76.
- Построены графики зависимости температурных коэффициентов от уровней возмещения и радиальных переменных.

Анализ результатов расчета нормированных температурных коэффициентов для изотермической модели атмосферы и модели US76 приводит к следующим выводам:

- изменение температуры на один градус в слое в одну радиационную единицу приводит к изменению ФПР на  $(0.2 - 0.6)\%$  при возмущениях атмосферы в приземном слое  $t_1 \approx (0 \div 0.03)$  рад. ед. и  $0.06\%$  — для  $t_1 \approx 4$  рад. ед.;

- увеличение температуры атмосферы приводит к уменьшению плотности частиц в области  $r \leq (10 - 20)$  м и ее росту — при  $r > 40$  м. В области  $r \approx (20 - 40)$  м температурный эффект ФПР электронов минимален,
- результаты слабо зависят от модели атмосферы.

# Заключение

Основные результаты выпускной квалификационной работы заключаются в следующем:

1. Изучена структура программного комплекса CORSIKA. Выполнена конфигурация кода для проведения расчетов функции пространственного распределения (ФПР) электронов в двух режимах: с использованием приближенного аналитического решения НКГ и прямым моделированием с использованием модуля EGS4.
2. Проведена модификация блока НКГ кода CORSIKA для расчета температурных коэффициентов электронной компоненты ШАЛ. Выполнена отладка и настройка модифицированного кода.
3. Проведены расчеты нормированных температурных коэффициентов для изотермической модели атмосферы и модели US76. Анализ полученных результатов приводит к следующим выводам.
  - Изменение температуры на один градус в слое в одну радиационную единицу приводит к изменению ФПР на  $(0.2-0.6)\%$  при возмущениях атмосферы в приземном слое  $t_1 \approx (0 \div 0.03)$  рад. ед. и  $0.06\%$  — для  $t_1 \approx 4$  рад. ед.
  - Увеличение температуры атмосферы приводит к уменьшению плотности частиц в области  $r \leq (10 - 20)$  м и ее росту — при  $r > 40$  м. В области  $r \approx (20 - 40)$  м температурный эффект ФПР электронов минимален.

- Результаты слабо зависят от модели атмосферы.

Автор выражает благодарность всем преподавателям кафедры радиофизики и теоретической физики, принимавшим участие в обсуждении работы, а также научному руководителю доценту Волкову Н.В. за руководство, постановку задач, обсуждение результатов и помощь в подготовке к защите.

# Литература

1. CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers: FZKA: 6019 / Forschungszentrum Karlsruhe; Executor: D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle et al. 1988.
2. *Kampert, K. H.* Cosmic rays in the «knee»-region — recent results from KASCADE / K. H. Kampert, T. Antoni, W. D. Apel et al. // *Acta Phys. Pol. B.* — 2004. — Vol. 35. — no. 6–7. — Pp. 1799–1812.
3. *Ostapchenko, S. S.* QGSJETII-II: towards reliable description of very high energy hadronic interactions / S.S. Ostapchenko // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*. — 2006. — Vol. 151. — no. 1. — Pp. 143–146.
4. *Fletcher, R. S.* SIBYLL : An event generator for simulation of high energy cosmic ray cascades / R.S. Fletcher, T.K. Gaisser, P. Lipari, T. Stanev // *Phys. Rev. D.* — 1994. — Vol. 50. — no. 9. — Pp. 5710–5731.
5. The EGS4 code system: SLAC-R: 265; Executor: W. R. Nelson, H. Hirayama, D. W. O. Rogers: SLAC, 1985. — URL: <http://www.slac.stanford.edu/pubs/slacreports/slac-r-265.html>.
6. *Capdevielle, J. N.* The radial electron distribution in extensive air showers / J.N. Capdevielle, J. Gawin // *Nucl. Phys. G.* — 1982. — Vol. 8. — no. 9. — Pp. 1317.
7. *Fasso A., Ferrari A., Sala P. R.* Electron-photon transport in FLUKA: status // *Advanced Monte Carlo for Radiation Physics, Particle Transport Simulation and Applications* / Ed. by A. Kling, F. J. C. Barao, M. Nakagawa et al. — Springer, 2001. — P. 159–164.
8. *Werner, K.* The hadronic interaction model EPOS / K. Werner // *Nucl.*

- Phys. B (Proc. Suppl).* — 2008. — Vol. 175–176. — Pp. 81–87.
9. Extensive Air Shower Simulation with CORSIKA: A User's Guide (Version 7.6400) / D. Heck and T. Pierog, Institut für Kernphysik. — 2017. — 176 p.
  10. CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers / D. Heck, J. Knapp, J.N. Capdevielle. — Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe. — 1998. — 90 p.
  11. Geant4 — a simulation toolkit. Official site. [Electronic resource]. URL: <http://geant4.web.cern.ch/>
  12. Agostinelli S. et al. (Geant4 Collaboration) Geant4 — a simulation toolkit // NIMP A. — 2003. — V. 506. — Pp. 250–303. DOI:10.1016/S0168-9002(03)01368-8
  13. Allison J. et al. (Geant4 Collaboration) Geant4 developments and applications // IEEE Trans. Nuc. Sci. — 2006. — V. 53. — Pp. 270–278. DOI:10.1109/TNS.2006.869826
  14. Allison J. et al. (Geant4 Collaboration) Recent developments in Geant4 // NIMP A. — 2016. — V. 835. — Pp. 186–225. DOI:10.1016/j.nima.2016.06.125
  15. Мурзин В.С. Астрофизика космических лучей: Учебное пособие для вузов. — М.: Университетская книга; Логос, 2007. — 488 с.
  16. *Lagutin, A. A.* New scaling property of the lateral distribution of the electrons in the electromagnetic cascade / A. A. Lagutin, A. V. Plyasheshnikov, V. V. Melentyeva // *Proc. of 25-th Intern. Cosmic Ray Conf.* — 1997. — Vol. 6. — Pp. 289–292.
  17. *Lagutin, A. A.* The lateral distribution of the electrons in the electromagnetic air shower / A. A. Lagutin, A. V. Plyasheshnikov, A. I. Goncharov // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*. — 1998. — Vol. 60. — Pp. 161–167.
  18. *Lagutin, A. A.* Lateral distribution of electrons in air showers / A. A.

- Lagutin, A. V. Plyasheshnikov, V. V. Melentyeva et al. // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*. — 1999. — Vol. 75A. — Pp. 290–292.
19. *Lagutin, A. A.* Electron lateral distribution in air showers: scaling formalism and its implications / A. A. Lagutin, R. I. Raikin, N. Inoue, A. Misaki // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* — 2002. — Vol. 28. — Pp. 1259–1274. — doi:10.1088/0954-3899/28/6/309.
20. *Лагутин, А. А.* Метод сопряженных уравнений в теории переноса космических лучей высоких энергий: монография / А. А. Лагутин, В. В. Учайкин. — Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2013. — 293 с.
21. *Лагутин, А. А.* Влияние температурного эффекта на радиальное распределение электронной компоненты ШАЛ / А.А. Лагутин, Н.В. Волков, А.И. Гончаров и др. // *Изв. РАН. Сер. Физ.* — 2019. — Т. 83, № 8. — с. 1092–1095. — doi:10.1134/S036767651908026X.



Выпускная квалификационная работа выполнена мной совершенно самостоятельно. Все использованные в работе материалы и концепции из опубликованной научной литературы и других источников имеют ссылки на них.

\_\_\_\_\_ Бурлаков К.А.

«\_\_\_\_\_» июня 2020 г.