

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИКИ ЧАСТИЦ И КОСМОЛОГИИ

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**«Анализ структуры широких атмосферных ливней с
помощью методов машинного обучения»**

Выполнил студент
группы 243м
Позднухов Никита Алексеевич

подпись студента

Научный руководитель:
к.ф.-м.н.
Нугаев Эмин Яткярович

подпись научного руководителя

Научный консультант:
д.ф.-м.н.
Рубцов Григорий Игоревич

подпись научного консультанта

Допущена к защите

Зав. кафедрой _____

Москва
2023

Содержание

1	Введение	3
2	Эксперименты Ковер-2 и Ковер-3	6
2.1	Ковер-2	6
2.2	Ковер-3	7
3	Метод разделения фотонных и протонных ливней	10
3.1	Параметр скученности	12
3.2	Моделирование ШАЛ	14
4	Результаты моделирования	17
5	Классификатор событий	23
6	Заключение	29

1 Введение

Широкие атмосферные ливни (ШАЛ) — это каскады частиц, вызванные взаимодействием космических лучей с атмосферой. Первичные частицы высоких энергий рожают множество вторичных частиц, распространяющихся в атмосфере как в направлении импульса исходной частицы (оси ливня), так и в поперечной плоскости. Актуальной задачей в области физики космических лучей является определение их химического состава, в частности, доли первичных фотонов среди всех космических лучей. Гамма-кванты высоких энергий рожают электрон-позитронные пары за счёт взаимодействия с фоновым микроволновым излучением Вселенной [1]. Это серьёзно ограничивает длину свободного пробега фотонов высоких энергий. Однако в экспериментах наблюдаются фотоны с энергиями порядка десятков и сотен ТэВ, приходящие от источников, находящихся на очень больших расстояниях. Недавний пример такого события - GRB221009A, фотоны от которого были зарегистрированы LHAASO [2] и Ковер-2 [3]. Подобное фоновое излучение высоких энергий может возникать в моделях физики за пределами Стандартной Модели, где длина свободного пробега увеличивается за счёт новых процессов, например, аксион-фотонных осцилляций [4] [5]. Измерение диффузного потока таких фотонов и регистрация отдельных событий даёт возможность проверки подобных моделей новой физики. Также, актуальной задачей является ассоциация фотонных космических лучей с астрофизическими нейтрино высоких энергий в рамках многоканальной астрономии.

Эксперименты по детектированию широких атмосферных ливней обычно представляют собой разреженный массив сцинтиляционных или Черенковских детекторов, покрывающий большую площадь поверхности, которая может достигать нескольких сотен квадратных километров в экспериментах Telescope Array [6] и Pierre Auger Observatory [7]. Вторичные части-

цы ливня регистрируются отдельными детекторами, и по их показаниям восстанавливаются параметры ливня и энергия первичной частицы. Такие установки могут быть использованы для изучения гамма-излучения, если существует способ эффективного разделения ливней, вызванных первичными фотонами, от ливней, вызванных первичными протонами и ядрами более тяжёлых элементов. Стандартный метод такого разделения основан на том, что фотонные ливни содержат меньше адронов и мюонов, чем протонные. Мюоны рождаются в основном в распадах заряженных мезонов, которые появляются в результате адронных взаимодействий. Поэтому, выбирая ШАЛы с маленьким числом адронов или мюонов, можно пытаться выделить ливни, вызванные первичными фотонами. Этот метод впервые был предложен в работе [8]. Однако у такого способа есть несколько недостатков. Детектирование мюонов требует наличия подземных детекторов, почва над которыми поглощала бы электромагнитную компоненту ливня. Подобные установки большой площади обычно весьма дорогостоящие. Более того, такой способ разделения фотонных и адронных событий сложно применить для ливней высокой энергии, в которых число мюонов в фотонном ливне может быть сравнимо с протонным ливнем более низких энергий.

По этой причине ведутся поиски новых методов разделения фотонных и адронных ливней. Данная работа посвящена разработке нового метода выделения фотонных кандидатов для эксперимента Ковер-2 [9], и, в будущем, Ковер-3 [12] [13], который использует информацию о пространственной структуре широкого атмосферного ливня, получаемую от индивидуальных детекторов массива, в совокупности с другими параметрами ливня, определяемыми установкой. Метод разработан на основе Монте-Карло моделирования установки с применением методов машинного обучения. В разделе 2 данной работы кратко описан эксперимент Ковер-2/3 и его возможности. В разделе 3 описана идея метода разделения событий и про-

цедура моделирования. Раздел 4 посвящён результатам моделирования. В разделе 5 обсуждается построение классификатора событий, построенного на основе результатов моделирования, и возможность его применения к реальным данным.

2 Эксперименты Ковер-2 и Ковер-3

2.1 Ковер-2

Эксперимент Ковер-2 представляет собой установку для регистрации широких атмосферных ливней и одновременного измерения их электромагнитной, мюонной и адронной компоненты. Он состоит из центрального массива из 400 отдельных жидкостных сцинтилляционных детекторов площадью $0.5m^2$, полностью покрывающих квадрат площадью $200 m^2$, 6 выносных пунктов площадью $9m^2$ каждый, которые находятся на расстоянии 30 и 40 метров от основного массива, и мюонного детектора большой площади на расстоянии 48 метров от основного массива. Мюонный детектор состоит из 175 пластиковых сцинтилляторных детекторов площадью $1m^2$ каждый, которые находятся под землёй на глубине 2.5m, что соответствует пороговой энергии вертикальных мюонов в 1 GeV.

Для каждого события измеряются интегральные сигналы индивидуальных детекторов, вызванные взаимодействием вторичных частиц ливня со сцинтиллятором. Также, по показаниям и временам срабатывания детекторов выносных пунктов восстанавливаются азимутальный и зенитный углы оси ливня, а также координаты оси на уровне земли. По данным центрального массива восстанавливается реконструированная энергия ливня и энерговыделение в детекторах установки, а по данным мюонного детектора определяется полное число мюонов, прошедших через него. В эксперименте также определяется ряд других параметров широкого атмосферного ливня, менее существенных для данной работы. Подробное описание эксперимента и процедуры реконструирования параметров ливня приведено в статьях [9] [10] [11].

Центральный массив Ковер-2 уникален своим сплошным покрытием площади детекторами, что позволяет очень точно измерять положение оси

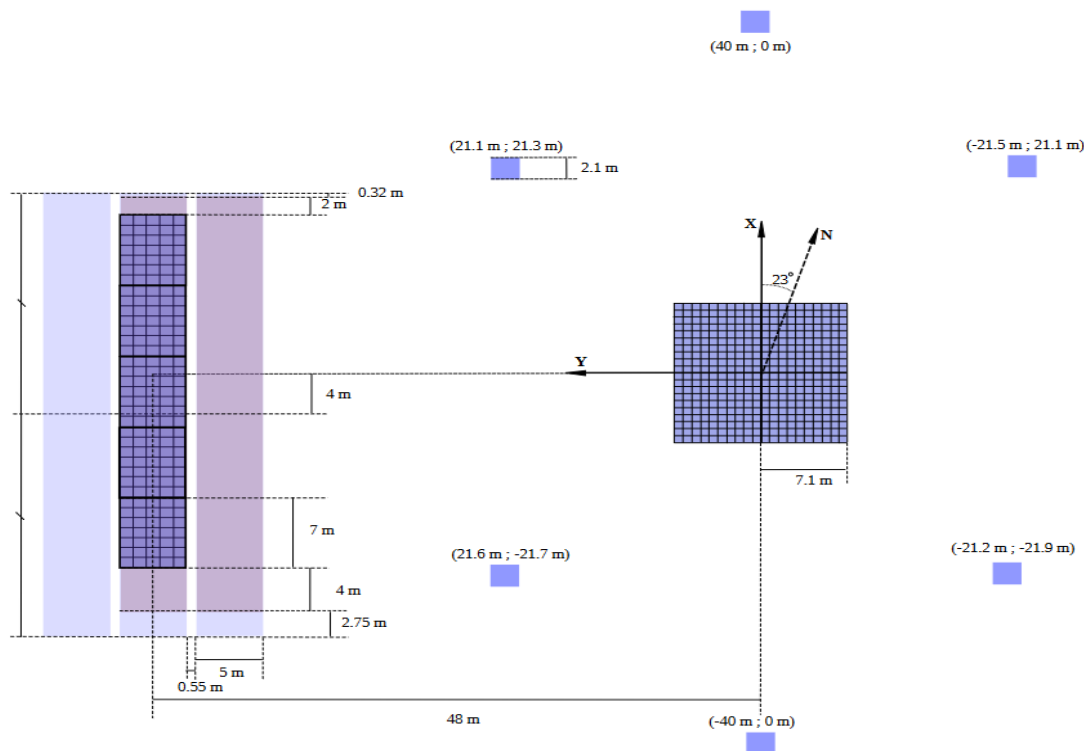


Рис. 1: Схема эксперимента Ковер-2, мюонный детектор слева находится под землей

ливня и функции поперечного распределения частиц. Погрешность измерения координат ливней с осями внутри центрального массива составляет около 0.35m (половина ширины отдельного детектора). Столь подробную информацию о структуре широкого атмосферного ливня можно использовать для анализа и выработки критерия разделения различных первичных событий, что будет подробно обсуждаться в разделе 3.

2.2 Ковер-3

В настоящее время ведётся работа по модернизации эксперимента [12] [13]. Планируется установка 33 новых детекторов, находящихся над мюонным детектором, для повышения углового разрешения эксперимента и

лучшей точности восстановления координат оси для широких атмосферных ливней вне центрального массива, а также увеличение площади мюонного детектора до 410m^2 . Изменения представлены на рис. 2, показано 25 из 33 новых детекторов. Поскольку данная работа использует информацию о пространственной структуре ливня, планируемая модернизация может значительно повысить точность используемых методов за счёт увеличения эффективной площади установки.

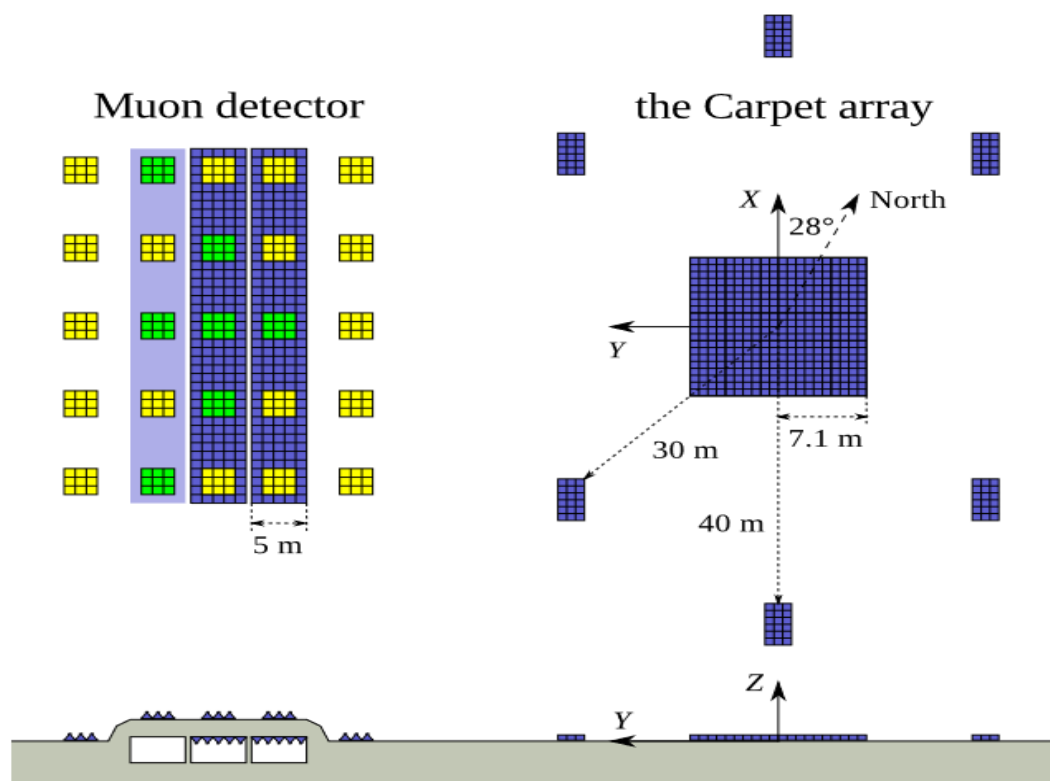


Рис. 2: Планируемая схема эксперимента Ковер-3

В недавнее время было зарегистрировано много событий, связанных с астрофизическими нейтрино с энергиями порядка 100 TeV и выше [14]. Вместе с нейтрино, предположительно появляющимися в источниках в распадах заряженных мезонов, могут возникать и фотоны в распадах нейтраль-

ных мезонов, имеющие тот же порядок энергии. Поэтому для успешного исследования диффузного потока фотонов и поиска точечных источников в этой области энергии необходимо применять процедуру выделения фотонных кандидатов, работающую на энергиях первичных частиц порядка PeV . Нынешний же метод классификации, использующийся для анализа данных Ковер-2 [11], показывает меньшую эффективность отбора фотонов, так как при таких энергиях даже в фотонных ливнях появляется значительное число мюонов, а отбираются именно маломюонные события. Далее предлагается новый метод выделения фотонных кандидатов, в дополнение к числу мюонов использующий ряд других переменных.

3 Метод разделения фотонных и протонных ливней

В настоящее время из теоретических соображений и по результатам компьютерного моделирования известны следующие характерные отличия широких атмосферных ливней, вызванных фотонами, от протонных ливней:

- По сравнению с адронными ливнями, фотонные ливни сравнимой энергии более компактны, составляющие их частицы распространяются ближе к оси ливня. Это вызвано тем, что продукты электромагнитного каскада, - электроны, появляющиеся в процессе рождения пар, и фотоны, возникающие в результате тормозного излучения электронов, в среднем не получают большой поперечный импульс, характерный для продуктов адронных взаимодействий(см., например, [15]).
- Фотонные ливни менее подвержены сильным флуктуациям по мере своего развития, которые типичны для адронных ливней([15] и источники внутри).
- Число мюонов в фотонных ливнях сильно меньше, чем в протонных ливнях сравнимых энергий. Это вызвано тем, что мюоны рождаются в результате фотоядерных взаимодействий(например, рождения π -мезонов) [16] [17]

На рисунке 3 показаны смоделированные траектории частиц ливней, вызванные первичным гамма-квантом, протоном и ядром железа одинаковой энергии 100 TeV. Видно резкое различие разных типов ливней.

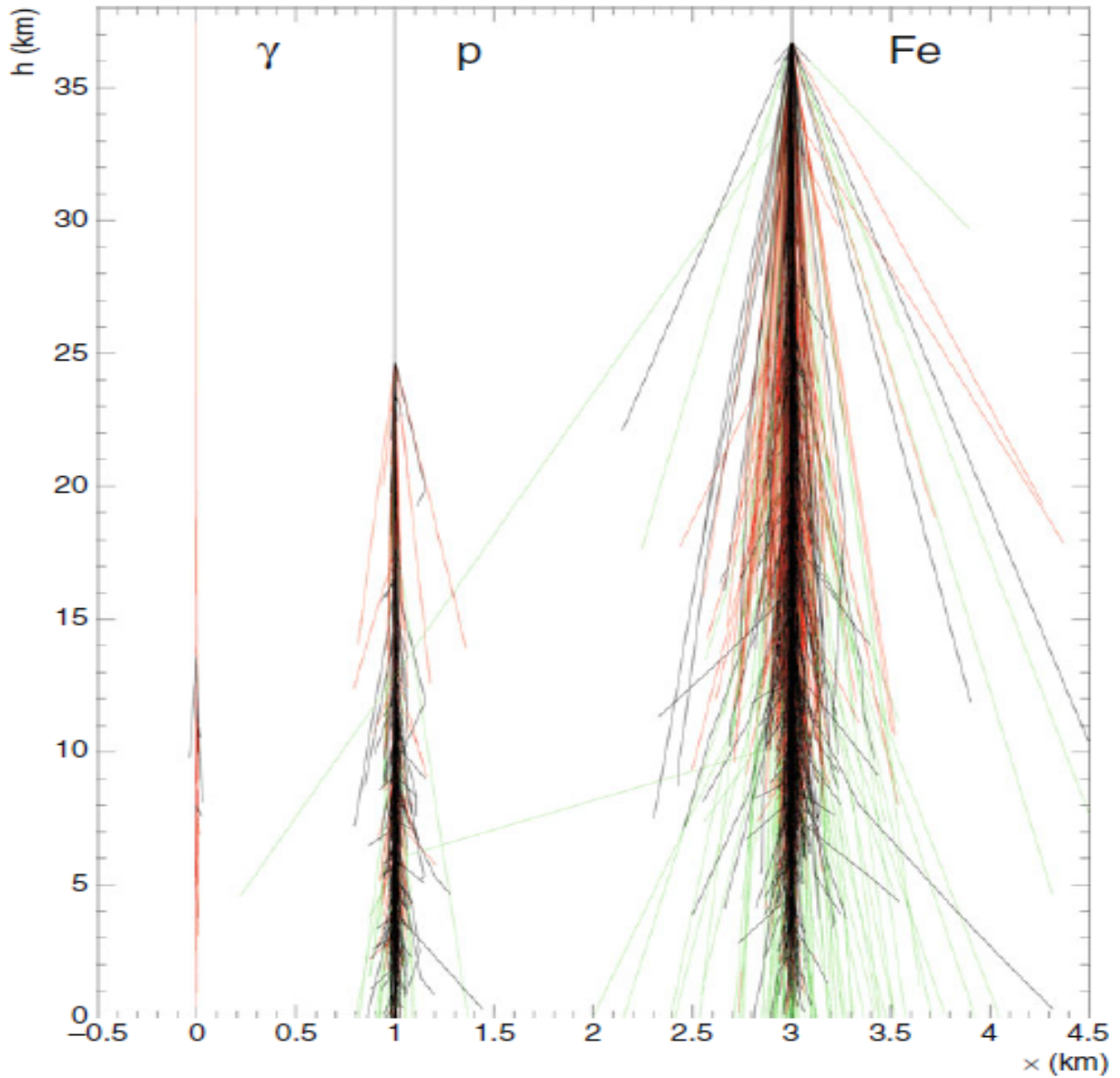


Рис. 3: Моделирование ливней от разных первичных частиц [15]. Энергия первичных частиц 100 TeV. Электромагнитная компонента показана красным, адронная чёрным, мюонная зелёным.

Идея данной работы состоит в том, чтобы численно охарактеризовать различие в поперечной структуре фотонных и адронных ливней, проверить возможность использования такого параметра для разделения различных типов первичных частиц, и построить классификатор ливней, используя

ций этот параметр в дополнение к уже применяющимся методам в эксперименте Ковер-2.

3.1 Параметр скупенности

Изучая поперечную функцию распределения частиц ливня, можно пытаться искать наличие вторичных ливней, вызванных вторичными адронами высокой энергии, измерять компактность ливня или «шероховатость» распределения частиц. Компактность была успешно применена в качестве разделяющего параметра в эксперименте HAWC [18], однако для Ковер-2 такой подход использовать затруднительно, так как это установка сравнительно малой площади. Поэтому в качестве нового разделяющего параметра предлагается скупенность P - переменная, чувствительная к угловой асимметрии функции распределения частиц. Эта переменная вычисляется в последовательных круговых кольцах одинаковой ширины с центром в оси ливня. Используется два различных определения такой переменной:

$$P_1 = \frac{1}{N} \cdot \sum_k \sum_i (S_{ik} - \langle S_k \rangle)^2 \quad (1)$$

Здесь S_{ik} - отклик детектора с номером i в кольце k , $\langle S_k \rangle$ - среднее показание детекторов в кольце k . Сумма по i является суммой по детекторам в кольце k , сумма по k - сумма по всем кольцам, начиная с нулевого радиуса, включающим в себя хотя бы один сработавший детектор, N - общее число сработавших детекторов. Таким образом, каждое слагаемое представляет собой квадратичное отклонение от среднего показаний детекторов в кольце k . Эта переменная определена так, что для распределения частиц, обладающего угловой симметрией, она стремится к нулю при росте числа частиц в ШАЛ. Если в распределении частиц присутствуют кластеры с большим числом частиц, это должно увеличивать значение скупенности. На рисунке 4 приведена иллюстрация к данному построению.

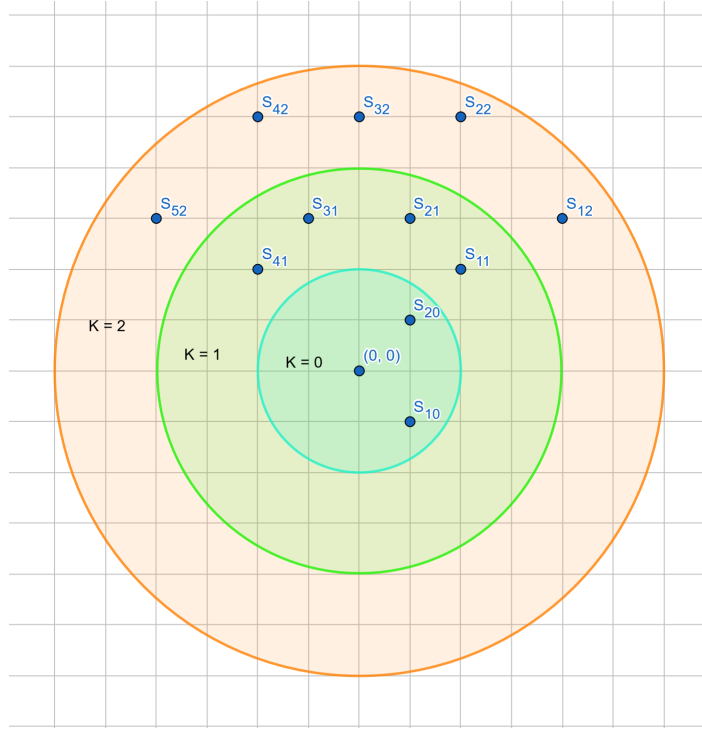


Рис. 4: Разбиение по кольцам, точка $(0,0)$ - ось ливня.

Второе определение скученности представляет собой сумму попарного квадрата разности сигналов детекторов в кольце k , нормированное на число детекторов и средний сигнал в кольце.

$$P_2 = \sum_k \frac{2}{N_k(N_k - 1)} \cdot \frac{1}{\langle S_k \rangle} \sum_{i>j} (S_{ik} - S_{jk})^2 \quad (2)$$

В дальнейших разделах будет исследована способность обоих вариантов расчёта скученности к разделению типов ливней, пока что отметим, что эти определения не тождественны при конечной ширине колец, размере детекторов и числе частиц. Ширина кольца была выбрана равной 2 метрам, исходя из геометрических размеров установки и результатов расчётов с разными значениями ширины.

3.2 Моделирование ШАЛ

Результаты данной работы основаны на компьютерном Монте-Карло (МК) моделировании широких атмосферных ливней и установки Ковер-2. Симуляция ливней производится с помощью пакета CORSIKA 7.4003 [19] с моделями адронных взаимодействий QGSJET-01c [20] и FLUKA2011.2c [21]. Взаимодействие частиц с элементами установки и восстановление параметров ливня рассчитывается с помощью отдельного МК кода Ковер-2 [11], модифицированного для данной задачи.

Исходный набор ливней включает в себя 1500 протонных и фотонных событий с энергиями от 31.6 TeV до 31.6 PeV. Ливни генерировались со спектром E^{-1} по энергии. Далее на рисунке 5 показана гистограмма кумулятивной функции распределения в логарифмическом масштабе. Хотя в реальности спектр космических лучей не подчиняется такому закону, для дальнейшего анализа важно, чтобы спектр фотонов и протонов был одинаковым, так как классификатор может использовать различия в спектре как подсказку для разделения.

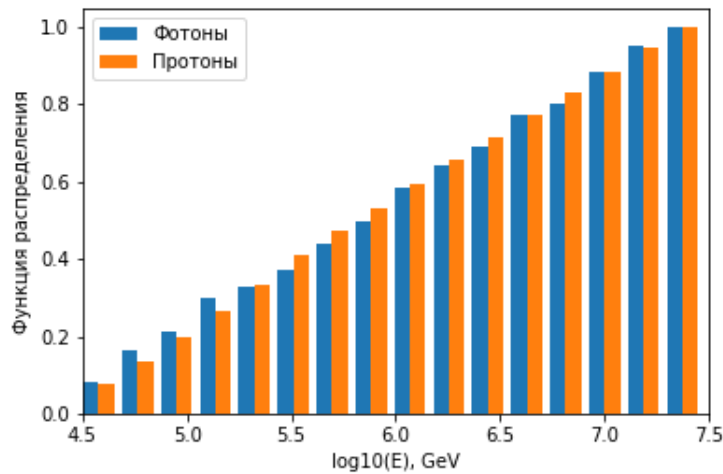


Рис. 5: Кумулятивная функция распределения энергии событий

Распределение первичных событий по азимутальному и зенитному углу(в пределах от 0° до 50°) соответствует изотропному распределению направлений прихода при условии геометрической экспозиции. Ограничение по зенитному углу обусловлено горным расположением установки. Для каждого исходного ливня случайным образом выбираются 100 различных координат оси на уровне земли в квадрате 20x20 метров с центром, совпадающим с геометрическим центром основного массива детекторов. Таким образом, весь набор данных включает в себя 150000 событий. После этого отбираются события, удовлетворяющие следующим условиям:

1. Число сработавших детекторов $N > 300$
2. Суммарное энерговыделение в центральном массиве $E_{carpet} > 500 \text{ GeV}$
3. Число мюонов, зарегистрированное мюонным детектором $N_\mu < 250$

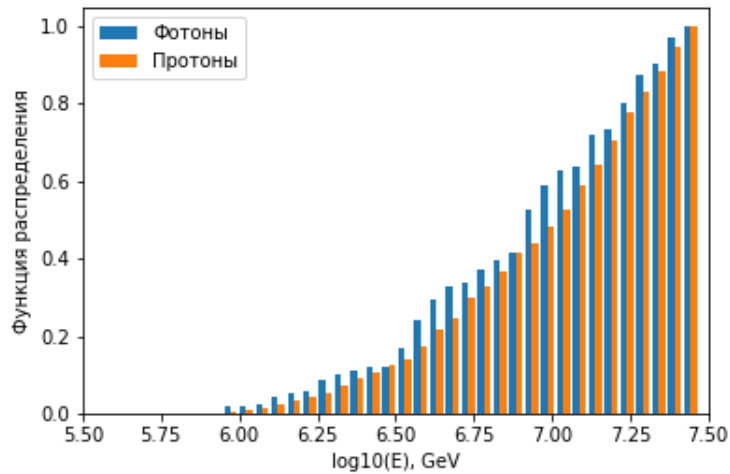


Рис. 6: Гистограмма кумулятивной функции распределения энергии событий после отбора

Первое условие используется в эксперименте для регистрации событий, оно же обеспечивает достаточное число детекторов для расчёта скученности. Третий критерий обусловлен насыщением мюонных детекторов. После

такого отбора спектр фотонных и протонных событий остаётся в достаточной степени одинаковым(рис. 6). После прохождения критериев отбора в наборе остаётся 24847 событий. Побочным эффектом выбора подходящих событий является потеря низкоэнергетичной части набора, но, поскольку основной интерес в этом исследовании проявляется к высокоэнергетичным ливням, это не является большим недостатком.

4 Результаты моделирования

В процессе моделирования с помощью той же процедуры, что и в эксперименте, восстанавливаются параметры ливня. Для классификации используются:

1. Восстановленные азимутальный и зенитный углы ϕ, θ
2. Восстановленные координаты оси X, Y
3. Энерговыделение в центральном детекторе E_{carpet}
4. Число мюонов в мюонном детекторе N_μ
5. Рассчитанные для каждого события параметры скученности P_1, P_2

На рисунках 7 и 8 представлена точечная диаграмма двух вариантов скученности в зависимости от энергии в детекторе(этот параметр даёт оценку энергии ливня на уровне земли).

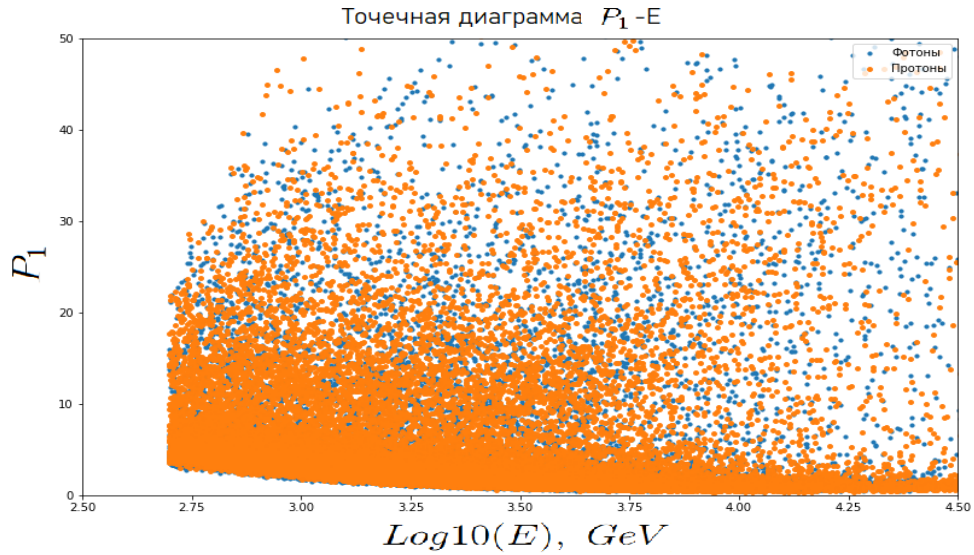


Рис. 7: Точечная диаграмма $P_1 - E$

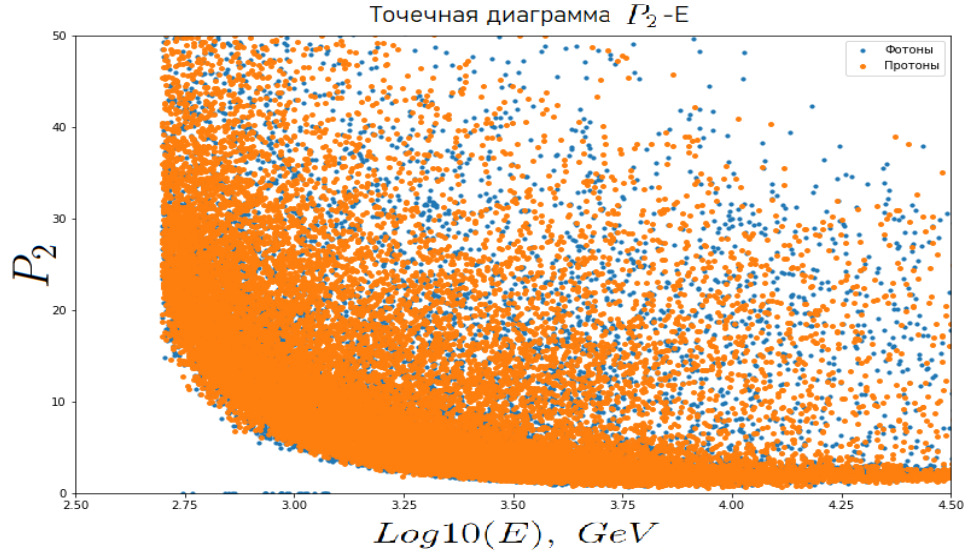


Рис. 8: Точечная диаграмма $P_2 - E$

Заметно, что скученность падает с ростом энергии. Это ожидаемый результат, так как площадь, покрываемая детекторами, сравнительно невелика, и при больших энергиях эффект флуктуаций должен проявляться на больших геометрических масштабах. Множество событий с большими значениями скученности, сильно превышающими среднее, частично вызваны тем, что ось ливня восстанавливается со значительной погрешностью для тех ливней, которые не попадают в центральный массив детекторов. Этот вопрос будет детально обсуждаться ниже. Явного разделения в пространстве параметров $P - E$ не наблюдается.

Однако если рассмотреть пространство параметров $P - N_\mu$ (рисунки 9, 10), то в нём ситуация становится заметно лучше. Кроме ожидаемого малого числа мюонов для ливней, вызванных фотонами, в нём видно область со значительным N_μ , где есть разделение по скученности! Именно такие события представляют интерес для данной работы, так как их невозможно было бы правильно идентифицировать только с помощью числа мюонов.

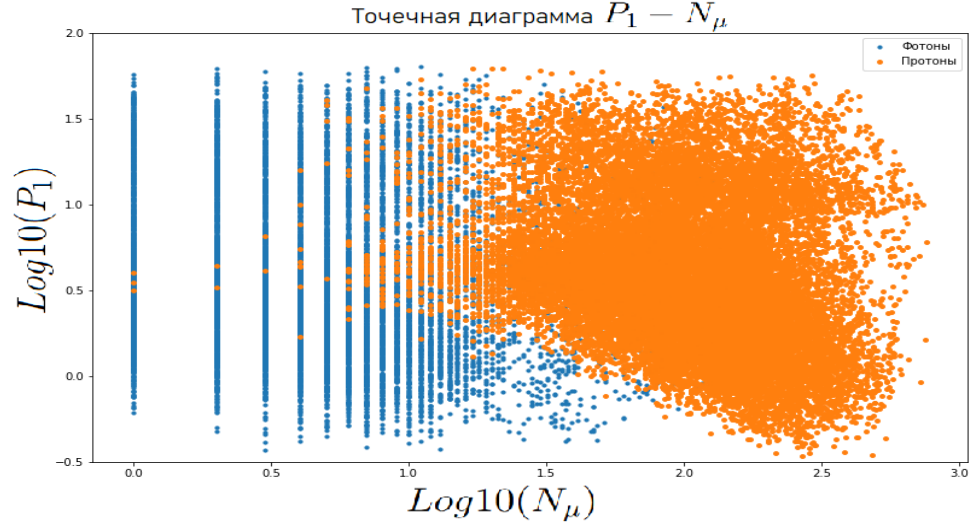


Рис. 9: Распределение $P_1 - N_\mu$

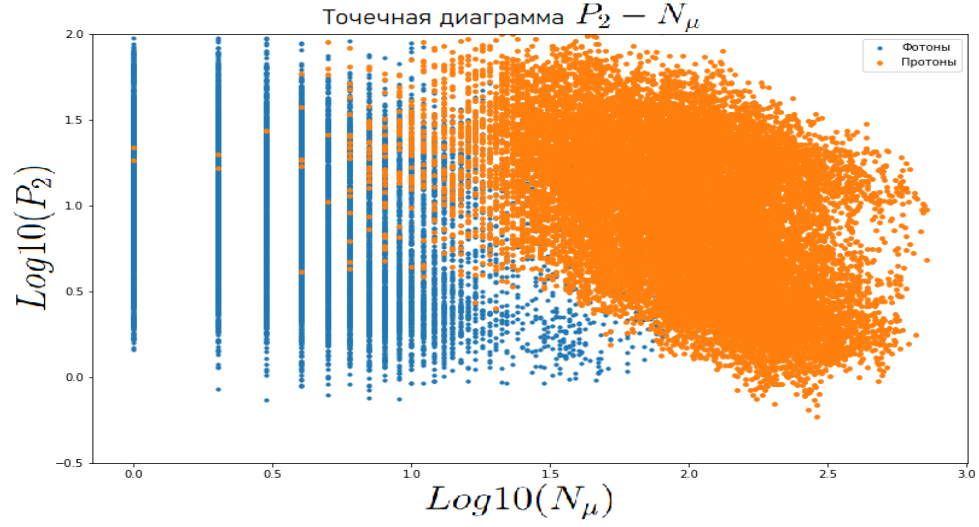


Рис. 10: Распределение $P_2 - N_\mu$

Большая часть событий из этой области имеет энергию порядка 5-20 PeV. Даже на основе такого двумерного анализа можно получить значительное увеличение эффективности определения фотонных кандидатов в этой области энергий.

Обсудим подробнее проблему восстановления координат оси ливня. Алгоритм восстановления, использующийся Ковер-2, имеет невысокую точность для случая ливней, не попадающих осью в центральный массив детекторов. Это связано с тем, что непрерывное покрытие площади детекторами позволяет напрямую измерить положение оси по энергосигналу в отдельных детекторах, только если она попадает в сам массив. В противном случае её положение восстанавливается по временным задержкам сигналов в выносных пунктах. На рисунке 11 приведено распределение восстановленных координат ливня без учёта центрального массива.

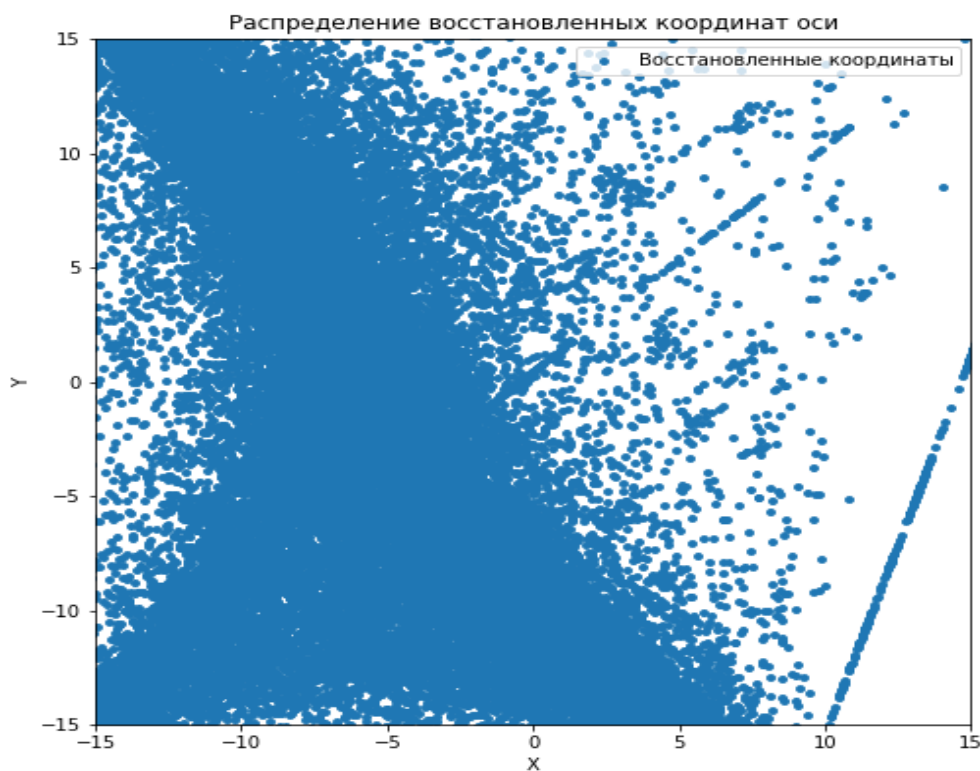


Рис. 11: Распределение восстановленных координат оси ливня (исходное распределение равномерно по всему квадрату)

Явно видна большая погрешность восстановления положения оси. Вычисление скученности весьма чувствительно к изменению координат оси, так как ширина отдельных колец весьма невелика. Поэтому можно ожидать увеличения точности, если оставить в выборке событий только те, которые изначально попадают в центральный массив. Далее приведены распределения $P_1 - N_\mu$ и $P_2 - N_\mu$ для таких ливней.

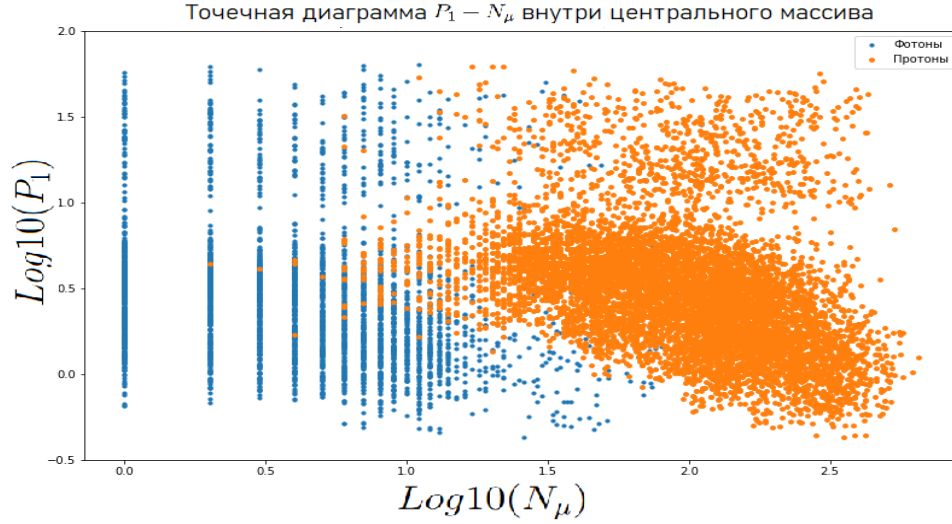


Рис. 12: Распределение $P_1 - N_\mu$,

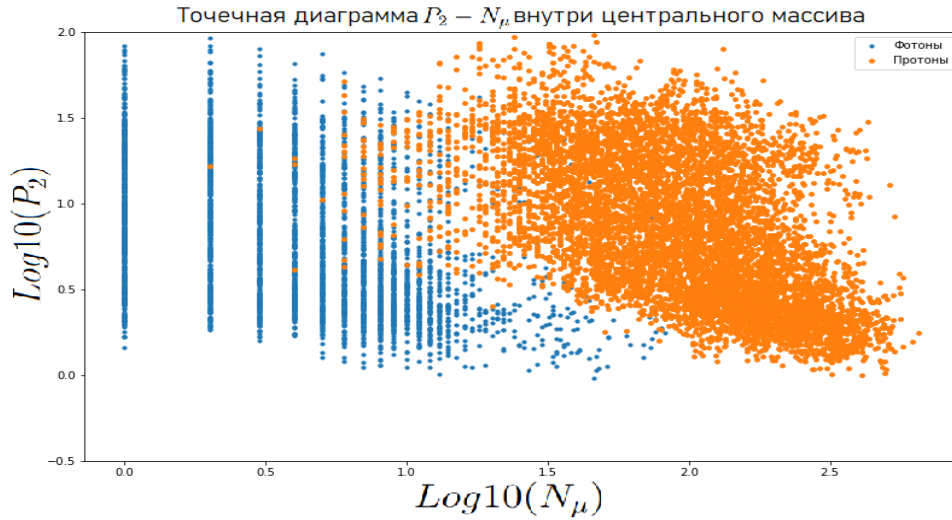


Рис. 13: Распределение $P_2 - N_\mu$,

Из рисунков 9-12 видно, что величина P_2 более устойчива к погрешности определения оси. Это, вероятно, вызвано нормировкой на среднее значение показаний детектора в каждом кольце. В работе используются обе метрики, а ошибка вычисления скученности оценивается путём случайного изменения координат оси ливня при вычислении, что будет описано далее. Можно также ожидать зависимости скученности от зенитного угла, так как ливни, пришедшие под большими углами, проходят больший путь в атмосфере и дольше развиваются. Поэтому зенитный угол включён в набор исходных данных для классификатора.

5 Классификатор событий

Классификатор, выделяющий фотонные события, в качестве входных данных принимает все параметры, перечисленные в начале раздела 4. В качестве алгоритма классификации выбран градиентный бустинг на основе деревьев решений. Реализация использует пакет XGBoost [22]. Включение координат оси и азимутального угла имеет целью частично скомпенсировать ошибку вычисления скученности. При этом эти данные не дают лишних подсказок классификатору, так как распределение событий по координатам и углам является равномерным.

Для правильной оценки точности классификатора используются раздельные тренировочный и тестовый набор данных, полученные случайным разбиением исходного набора на две равные части. Проверка результатов на независимом тестовом наборе позволяет отследить феномен переобучения классификатора, - ситуации, когда он заучивает входные тренировочные данные, а не выделяет какие-либо закономерности. На выходе классификатор даёт один параметр, оценивающий уверенность алгоритма в том, является ли данное событие фотонным. Значение 1 обозначает фотонное событие, 0 - протонное. Далее приведено распределение этого параметра (назовём его вероятностью события быть фотонным) на тестовом наборе данных. Метрика точности (доля правильно определённых событий) при выбранной границе разделения, равной 0.5, составляет 0.953. Выбор границы классификации можно осуществить разным образом. Обычно для анализа бинарных классификаторов применяют так называемую ROC-кривую.

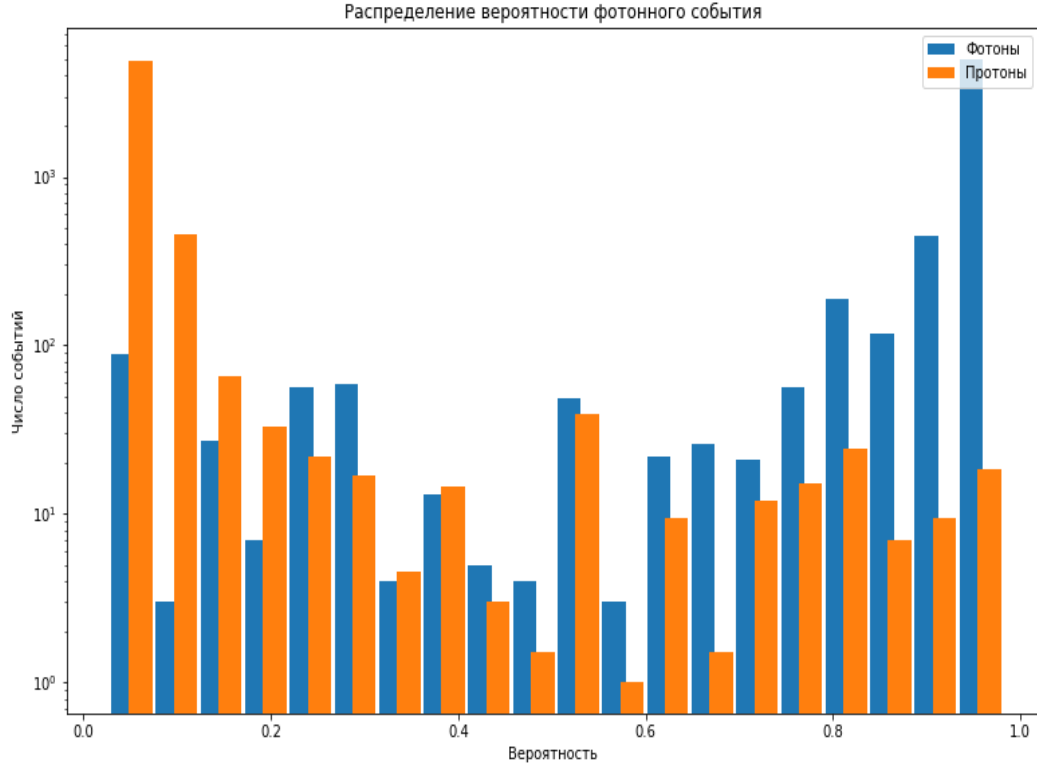


Рис. 14: Распределение выходного параметра классификатора

Определяются величины, характеризующие долю правильно определённых фотонов и неправильно определённых протонов (фальшивых фотонов) для заданной границы разделения:

$$TPR = \frac{true\ positive}{true\ positive + false\ negative} \quad (3)$$

$$FPR = \frac{false\ positive}{false\ positive + true\ negative} \quad (4)$$

После этого строится график $TPR(FPR)$ в зависимости от границы разделения. Это позволяет получить критерий выбора границы, требующийся для конкретной задачи.

Далее приведён график ROC-кривой для классификатора фотонов.

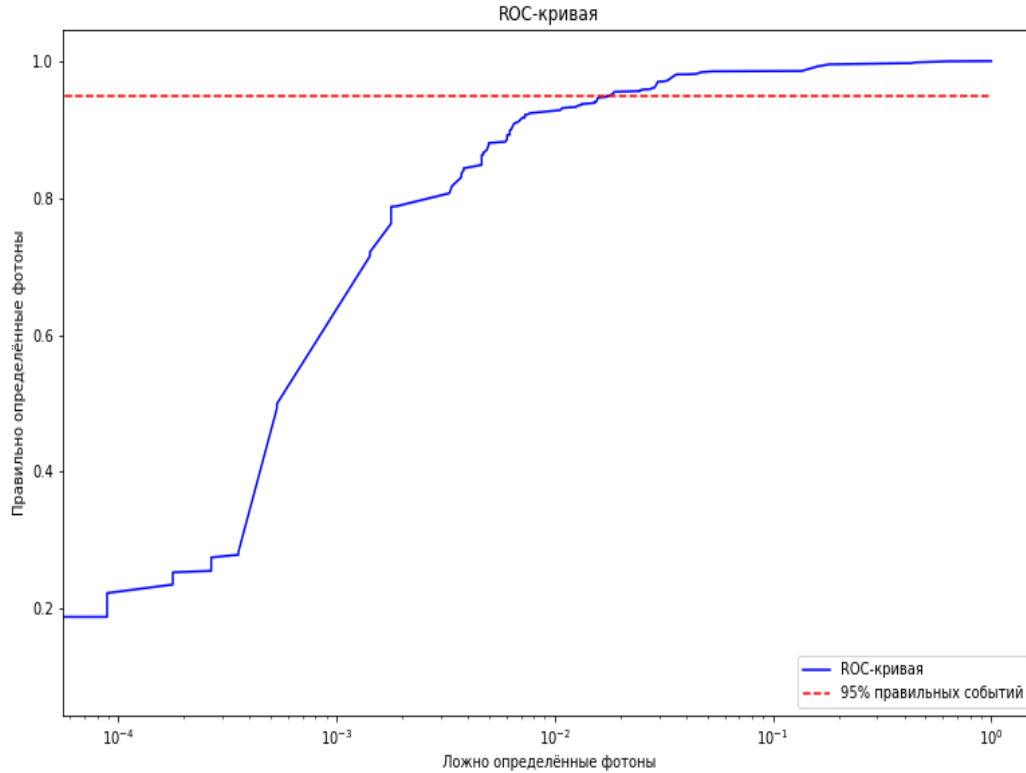


Рис. 15: ROC-кривая

Конкретная задача поиска фотонных событий может требовать разной строгости классификатора, и ROC-кривая позволяет оценить долю «фальшивых» фотонов, определяемых классификатором. Заметим, что при 95% правильно определяемых фотонов доля ложно определённых фотонов всего 10^{-2} ! Однако, этот результат может быть несколько преждевременным из-за уже обсуждавшейся проблемы восстановления координат оси и вычисления скученности. Для оценки ошибки, вызванной этим фактором, предлагается следующее:

- Обучить классификатор на событиях, попадающих в центральный массив детекторов

- В качестве тестового набора взять набор, где значения скученности рассчитаны с учётом известной погрешности определения координат оси (половина размера индивидуального детектора)

Эта процедура может дать оценку погрешности для широких атмосферных ливней с осью внутри основного массива. Ниже приведены график распределения вероятности фотонных событий и ROC-кривая для такого тестового набора.

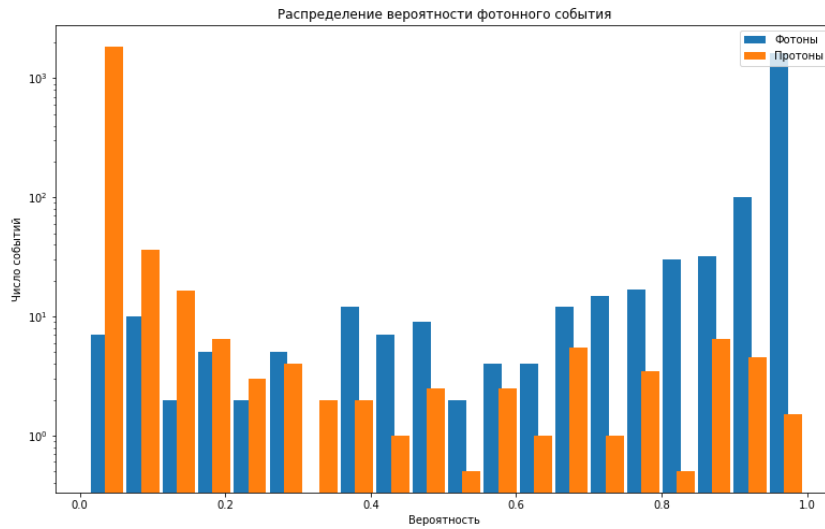


Рис. 16: Распределение выходного параметра классификатора для событий, попадающих в центральный детектор с учётом погрешности восстановления оси

Результат сравним с обучением на полном наборе данных, несмотря на введение погрешности вычисления скученности. Точность при границе классификации равной 0.5 составляет 0.96. Связано это со значительно более точным определением положения оси внутри центрального детектора. Таким образом, алгоритм можно применять для событий, попадающих в центральный массив.

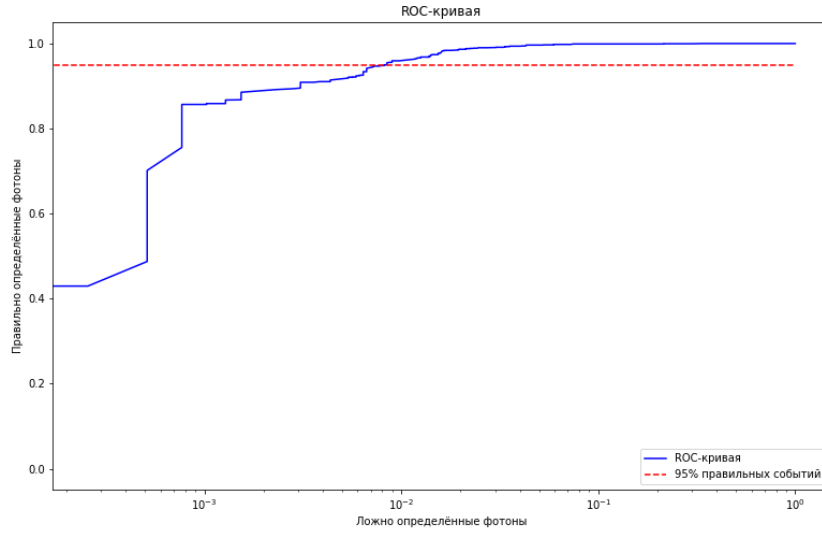


Рис. 17: ROC-кривая для событий, попадающих в центральный детектор с учётом погрешности восстановления оси

Столь хорошее поведение ROC-кривой вызвано тем, что значительная часть фотонных событий является маломюонной, и классификатор на них легко набирает большую точность. Поэтому для данной работы важна именно та часть кривой, где начинает значительно расти число ложноположительных событий. Более того, в реальности фотонных событий намного меньше, чем протонных. Поэтому получение верхних ограничений на поток фотонов требует очень строгого выбора границы классификации.

После дополнительных проверок планируется использовать данный метод выделения фотонных кандидатов для обработки данных эксперимента Ковер-2, и в дальнейшем применить его в эксперименте Ковер-3, в котором должна быть увеличена точность определения оси ливня вне центрального массива за счёт установки новых детекторов. Метод классификации, описанный в данной работе, может быть применён для поиска источников высокоэнергетичных фотонов, оценки диффузного потока фотонов. Также с помощью дополнительного Монте-Карло моделирования можно получить

более точные оценки потоков от отдельных источников, проведя моделирование событий, приходящих с соответствующего направления.

6 Заключение

В работе разработан новый метод классификации типов первичных частиц широких атмосферных ливней для эксперимента Ковер-2. Предложена метрика, чувствительная к неоднородностям поперечного распределения плотности частиц ливня, и на основе градиентного бустинга построен классификатор фотонов, использующий эту метрику в дополнение к другим переменным. Показана эффективность классификатора. Используемый метод позволяет регистрировать фотонные события, недоступные для способа выделения фотонных кандидатов, основанного только на числе мюонов в ливне. Такие события находятся в интересной для различных задач астрофизики области энергий, и их детектирование позволит поставить новые ограничения на диффузный поток фотонов и потоки от точечных источников. Предлагаемый метод может быть применён и для модернизированного эксперимента Ковер-3 с ожидаемым увеличением точности классификации ливней с осью вне основного детектора, что может значительно увеличить эффективную площадь установки.

Автор работы выражает огромную благодарность Г.И.Рубцову, С.В.Троицкому и коллаборации Ковер-3 за ценные замечания, обсуждение задачи и помощь в работе.

Список литературы

- [1] A.I. Nikishov, Sov. Phys. JETP 14 (1962) 393 [ZhETF 41 (1962) 549].
- [2] LHAASO Collaboration, GCN Circular n. 32677 (2022), <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/32677.gcn3>.
- [3] Carpet-2 Collaboration, ATel 15669 (2022), <https://astronomerstelegam.org/?read=15669>.
- [4] G. Galanti and M. Roncadelli, Universe 8, 253 (2022).
- [5] Troitsky, S.V. Parameters of Axion-Like Particles Required to Explain High-Energy Photons from GRB 221009A. JETP Lett. 116, 767–770 (2022).
- [6] Abu-Zayyad et al. (Telescope Array), Nucl. Instrum. Meth. A689, 87 (2013), arXiv:1201.4964.
- [7] J. Abraham et al., “Properties and performance of the prototype instrument for the Pierre Auger Observatory,” Nucl.Instrum.Meth., vol. A523, pp. 50–95, 2004.
- [8] Maze R, Zawadzki A, On an attempt of detection of primary cosmic photons of very high energy. Nuovo Cim. 1960; 17: 625.
- [9] Dzhappuev D et al 2009 Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 73 603–5.
- [10] Dzhappuev, D. D., Dzaparova, I. M., Gorbacheva, E. A., et al. EPJ Web of Conf. 207, 03004 October (2019).
- [11] Dzhappuev, D. D., Dzaparova, I. M., Gorbacheva, E. A., et al. JETP Letters 109(4), 226–231 February (2019).
- [12] Szabelski, J. Nuclear Physics B Proceedings Supplements 196, 371–374 arXiv:0902.0252 (2009).

- [13] V S Romanenko et al 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 1787 012038.
- [14] Aartsen, M. G., Abbasi, R., Abdou, Y., et al. Science 342, 1242856 (2013).
- [15] Extensive Air Showers: High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects - A Tutorial, Reference Manual and Data Book. ISBN: 978-3-540-76941-5. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [16] Stanev, T.: Phys. Rev. D, 33, p. 2740 (1986).
- [17] Halzen, F., et al.: Phys. Rev. D, 55, p. 4475 (1997).
- [18] Abeysekara and et. al, Observation of the Crab Nebula with the HAWC Gamma-Ray Observatory, The Astrophysical Journal 843 (2017) 39.
- [19] D. Heck et al., CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers, Tech. Rep. 6019, FZKA (1998).
- [20] N. N. Kalmykov and S. S. Ostapchenko, Phys. Atom. Nucl. 56 (1993) 346 [Yad. Fiz. 56 (1993) 105].
- [21] G. Battistoni et al., AIP Conf. Proc. 896 (2007) 31.
- [22] Chen, T., Guestrin, C. (2016). XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. In Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (pp. 785–794). <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>.