

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

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИКИ КОСМОСА

КУРСОВАЯ РАБОТА

**РАЗВИТИЕ МЕТОДА ОЦЕНКИ ЭНЕРГИИ ПО ЧЕРЕНКОВСКОМУ
ОБРАЗУ В НИЖНЕМ ТЕЛЕСКОПЕ УСТАНОВКИ СФЕРА-3**

Выполнил студент

414 группы

Научный руководитель:

Допущена к защите _____

Зав. кафедрой _____
(подпись)

Москва

Оглавление

Введение	2
1 Литературный обзор	3
1.1 Идея метода регистрации	3
1.1.1 Черенковский свет	3
1.1.2 Метод А.Е.Чудакова	3
1.2 Детектор СФЕРА-3	4
1.2.1 Отраженный черенковский свет в детекторе	4
1.2.2 Прямой черенковский свет в СФЕРА-3	6
2 Материалы и методы	10
2.1 Пакеты программ	10
2.2 Метод оценки энергии	10
2.3 Метод определения ложной оси	13
3 Поиск критерия определения ложного максимума.	14
3.1 Разделение по $f^{cn_{surf}}$ от аппроксимации плоскостью.	14
3.2 Критерий разделения по относительным величинам.	14
Выводы	21
Литература	22

Введение

Первичные космические лучи (ПКЛ) — потоки заряженных частиц высокой энергии, которые приходят к Земле со всех сторон космического пространства и бомбардируют её атмосферу. Чтобы понять механизм ускорения частиц изучается химический состав ПКЛ и энергетический спектр [1]. При сверхвысоких энергиях первичные частицы в результате взаимодействия с ядрами воздуха образуют большие каскады частиц - широкие атмосферные ливни (ШАЛ). Анализируя ШАЛ, можно определить массовый состав и энергетический спектр космических лучей в диапазоне энергий $10^{15} - 10^{20}$ эВ. Информация о параметрах первичной частицы получается из характеристик вторичных частиц и их излучений. Одним из методов определения характеристик первичной частицы является метод А.Е.Чудакова, основанный на измерении пространственно временной структуры черенковского света ШАЛ, отраженного от снежной поверхности. Проект СФЕРА направлен на определение параметров первичной частицы в области энергий выше 10^{15} эВ на основе метода А.Е. Чудакова [2]. Во второй версии эксперимента — СФЕРА-2 [3] помимо отраженного черенковского света был детектирован и прямой [4]. Это привело к идее создания СФЕРА-3, в котором планируется детектировать как прямой, так и отраженный черенковский свет. Регистрация ШАЛ двумя детекторами приведёт к повышению точности определения параметров первичных частиц. Планируется, что отражающей поверхностью будет выступать снежная поверхность озера Байкал, а телескоп будет подниматься БПЛА.

Глава 1. Литературный обзор

1.1 Идея метода регистрации

1.1.1 Черенковский свет

Излучение Вавилова-Черенкова или черенковское излучение - излучение среды, обусловленное движением частицы со скоростью выше скорости света в этой среде. При прохождении частицы множество атомов среды, находящихся на траектории движения частицы, поляризуются её электрическим полем и вследствие этого излучают. Волновой фронт фиксирован и имеет форму конуса, осью которого является траектория частицы, а вершиной является сама частица. Угол раствора определяется скоростью частицы и свойствами среды.

В каскаде ШАЛ присутствуют много заряженных частиц, скорость которых выше скорости света в среде. Основную массу составляют мюоны и электроны. Полный поток черенковского излучения может быть использован как мера энергии, потерянной ливнем в атмосфере, или, приближенно, полный поток пропорционален энергии первичной частицы.

1.1.2 Метод А.Е.Чудакова

Из экономических соображений в больших установках по регистрации частиц ШАЛ приходится располагать детекторы на большом ($\simeq 1$ км) расстоянии друг от друга. При этом основная часть потока частиц ливня проходит вдали от детектора, и восстановление полного числа частиц и положения оси ливня зависит от предположений о функции пространственного распределения (ФПР) плотности частиц на больших расстояниях от оси. Экспериментальное изучение функции пространственного распределения и её флуктуаций требует увеличения имеющихся установок. Кроме того, если даже измерить точно число частиц данного ливня на уровне моря, то восстановление энергии первичной частицы будет сильно зависеть от предполагаемой модели развития каскада в атмосфере. В связи со значительной неопределенностью процедуры восстановления полной энергии больших ливней по показаниям небольшого количества детекторов плотности потока частиц, целесообразно дополнительно регистрировать черенковское излучение, создаваемое ливнем в атмосфере.

Детекторы черенковского излучения на наземных установках могут дать полезную информацию. Но определение полного потока черенковского излучения невозможно, поскольку они будут, так же как и детекторы частиц, регистрировать

интенсивность только на больших расстояниях от оси. Соответственно, вычисление полного потока будет зависеть от предполагаемой функции пространственного распределения черенковского света, то есть от модели развития ливня.

А.Е. Чудаков впервые предложил метод регистрации ченковского света ШАЛ, отраженного от снежной поверхности. Преимуществом этого метода является увеличение видимой площади земной поверхности, что позволит лучше определить полный поток фотонов. Автор метода предложил установить на борту самолёта или другого летательного аппарата два фотоумножителя и два электронно-оптических преобразователя с углами зрения $\pm 45^\circ$. Высота полёта составляла бы порядка 10 км. Регистрация светового пятна одновременно четырьмя детекторами даст возможность надежно исключить помехи. Управляющий сигнал, возникающий от двойных совпадений в ФЭУ, должен управлять как электронным затвором ЭОП, так и осциллографированием импульсов от ФЭУ. Дальнейший анализ снимков позволял бы оценить энергию и направление прихода.

Этот метод был реализован на практике в серии экспериментов СФЕРА. Сравнение полученных результатов с результатами наземной установки ТУНКА [5] показало, что они согласуются в первом приближении [6].

1.2 Детектор СФЕРА-3

На рис. 1.1 представлена конструкция детектора СФЕРА-3 [7]. Прочный металлический каркас связывает все элементы оптической системы: 1 — сферического зеркала, 2 — камеры на основе SiPM, 4 — измерительной аппаратурой, 3 — блендой для отсекаания боковой засветки, 5 — пластины-корректором. В частично затененной мозаикой центральной области зеркала может быть установлен датчик прямого черенковского света - 6. Мозаика разбита на сегменты, каждый из которых содержит 7 SiPM (Рис.1.2).

Телескоп СФЕРА-3 использует оптическую систему Шмидта с корректорной пластиной, чтобы уменьшить сферические эффекты аберрации и увеличить оптическое разрешение.

1.2.1 Отраженный черенковский свет в детекторе

Отражённый от снежной поверхности черенковский свет попадает на входное окно детектора, а после отражения от сферического зеркала попадает на мозаику кремниевых фотоумножителей. На сегментах мозаики возникает распределение фотонов, далее именуемое образом события. Из-за сложной геометрии

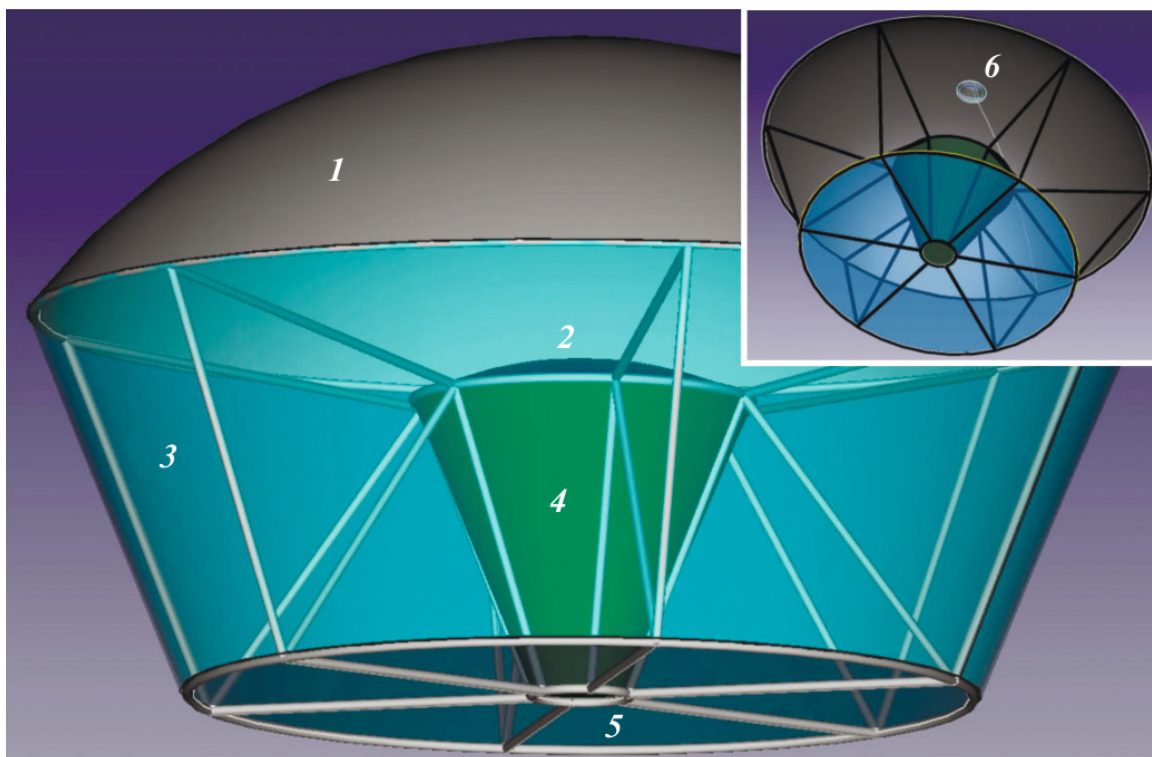


Рис. 1.1: Схема детектора СФЕРА-3. 1 — сферическое зеркало, 2 — камера на основе SiPM, 4 — измерительная аппаратура, 3 — бленда для отсекаания боковой засветки, 5 — пластина-корректор, 6 - приемник прямого черенковского света [7].

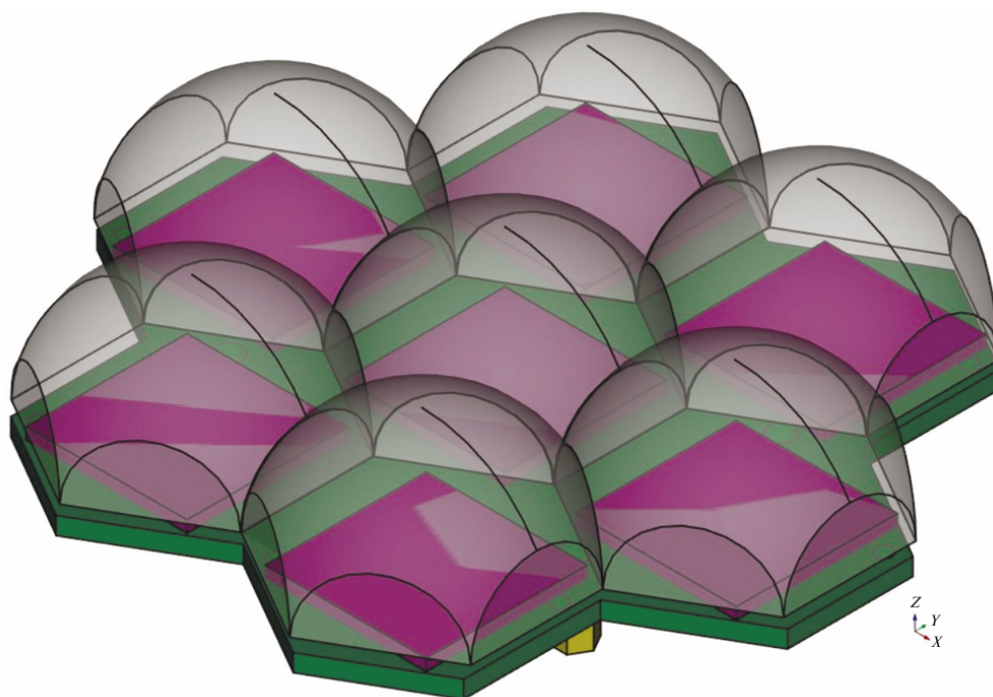


Рис. 1.2: Предварительная версия сегмента SiPM с линзовыми светособирающими [7].

телескопа образ будет несколько искажен. Это связано с неравномерностью засветки мозаики и с искажением площадей [8]. Для устранения данных эффектов количество фотонов умножается на корректирующие коэффициенты. ФПР получается из аппроксимации аксиально-симметричной функцией [7]:

$$f(r) = \frac{p_0^2}{(1 + p_1 r + p_2 r^2 + p_3 r^{1.5})^2 (1 + p_4 r^s)} \quad (1.1)$$

Местоположение оси ШАЛ оценивается как центр масс двух колец вокруг измерительного канала, содержащего наибольшее количество фотонов. Если этот канал находится на предпоследнем кольце сегментов, то за ось берётся центр масс одного кольца вокруг самого яркого канала (рис.1.3) [7].

Метод определения массы описан в статье [9]. Оценка производится на основе вычисления для каждого события ШАЛ двух критериальных параметров cri_1 и cri_2 , переходу от двумерного признакового пространства к массам в виде функции R_C и поиску максимума плотности вероятности распределения R_C .

$$cri_1 = \frac{\int_0^{r1} f(r) dr}{\int_{r1}^{r2} f(r) dr} \quad (1.2)$$

$$cri_2 = \frac{\int_0^{r0} f(r) dr}{\int_{r1}^{r2} f(r) dr} \quad (1.3)$$

$$R_C(cri_1, cri_2) = \sqrt{cri_1^2 + cri_2^2}, \quad (1.4)$$

где $r1$ — внутренний радиус, $r2$ — внешний радиус, а $r_0 \in (0, r_1)$.

Для оценки энергии используется метод, описанный в главе "Материалы и методы".

1.2.2 Прямой черенковский свет в СФЕРА-3

Для получения характеристик первичной частицы анализируется угловое распределение черенковского света. Положение детектора относительно оси ливня определяется азимутальным углом и расстоянием от оси детектора до оси ливня. Детектор видит ливень сбоку, поэтому пятно света в поле зрения детектора ориентировано своей длинной осью в направлении ливня относительно детектора.

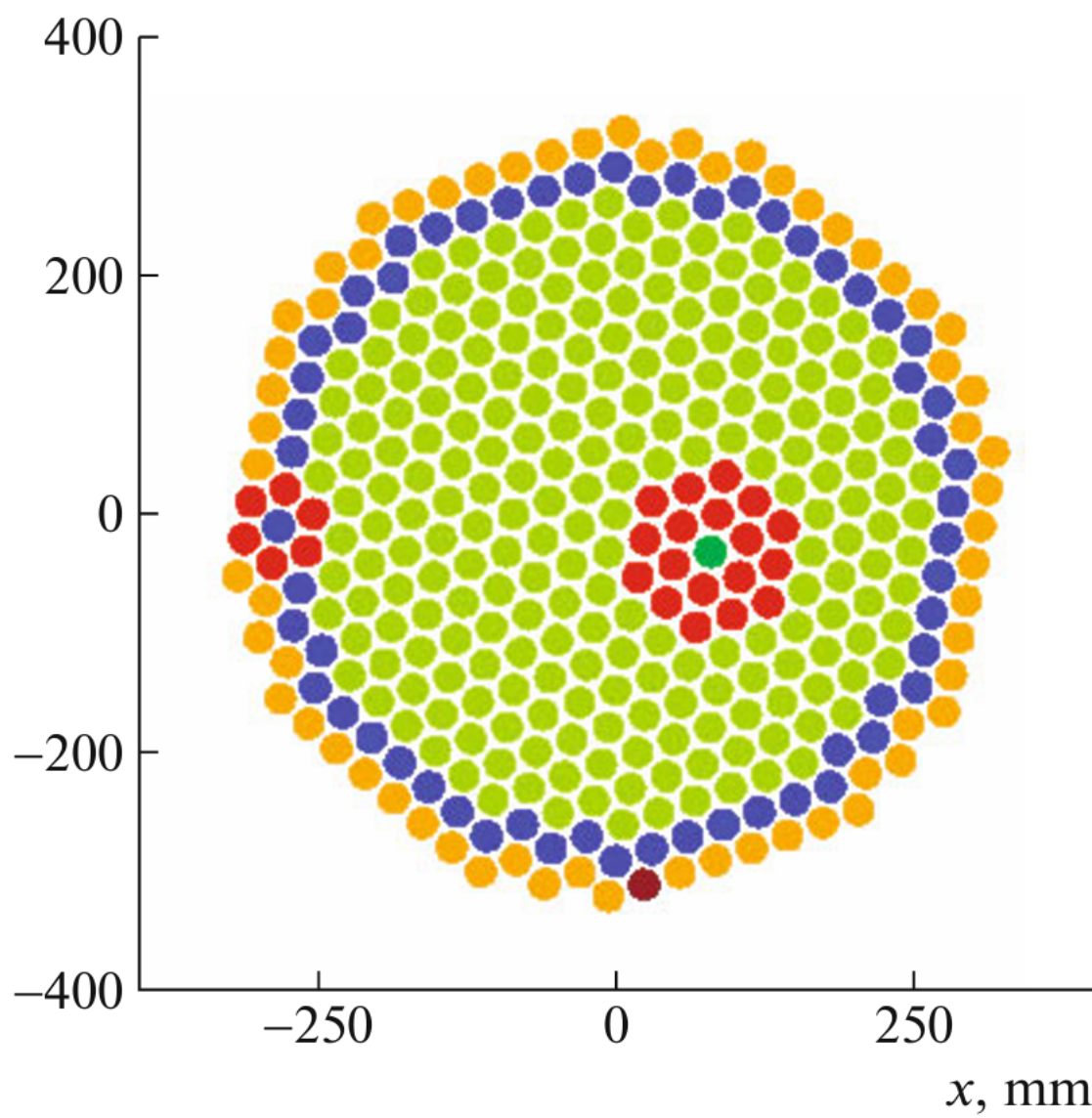


Рис. 1.3: Примеры колец, используемых в процедуре определения оси [7].

Для оценки направления используется максимум или центр масс распределения (рис.1.4) [7].

Классификация ядер по массе осуществляется путем анализа большой оси пятна или черенковского изображения. Для двух разделенных групп ядер задается критическая длина. Если ось больше критической, то частица приписывается к группе лёгких ядер, если меньше — к группе более тяжёлых.

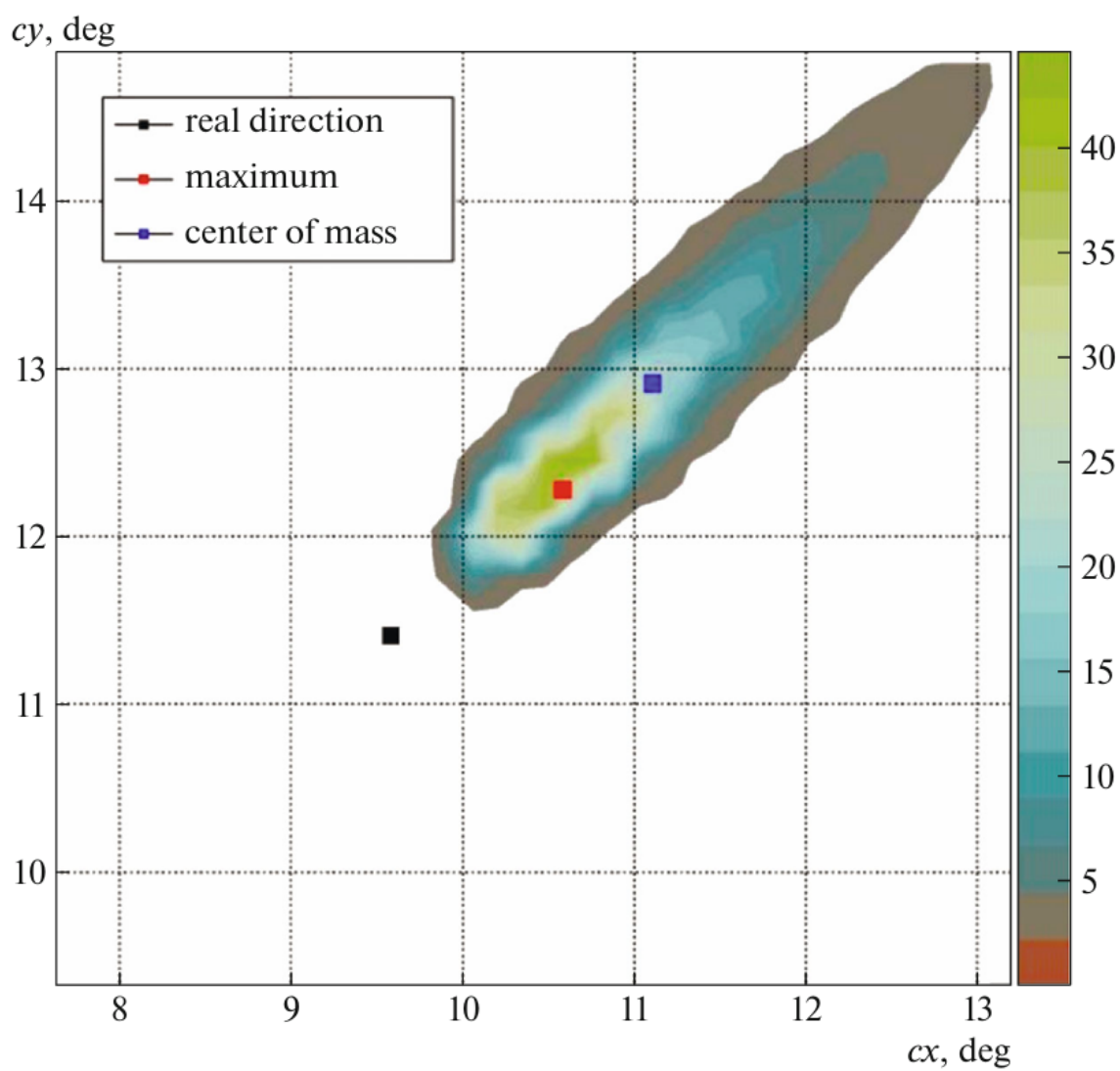


Рис. 1.4: Распределение прямого черенковского света от протона с энергией 10 ПэВ. Точки оси ливня (чёрная), максимума (красная) и центра масс (синяя) распределения [7].

Глава 2. Материалы и методы

2.1 Пакеты программ

Для генерации событий используется приложение CORSIKA [10]. Как результат получается предобраз - распределение фотонов на входном окне телескопа. С помощью GEANT-4 [11] фотоны по данным из предобраза пропускаются через модель [12]. В результате получается распределение фотонов на мозаике - образ события. Анализ данных и написание методов производится на языке Python [13] с помощью библиотеки Pandas [14]. Для аппроксимации образов используется пакет IMinuit [15].

2.2 Метод оценки энергии

Метод оценки энергии основан на обратной интерполяции зависимости Q — полного интеграла аппроксимирующей образ функции — от расстояния R от оси телескопа до оси ливня на снегу. Это значит, что для оценки энергии необходимы два параметра: значение Q_{exp} и R_{exp} . Для определения этих параметров производится аппроксимация данных образа аксиально-симметричной функцией (1.1). Далее по набору зависимостей $Q(E, R)$ (рис. 2.1) для фиксированного R равного R_{exp} строится зависимость $E(Q)$ (рис. 2.2), а уже по известному параметру образа Q_{exp} определяется энергия E_{exp} .

Чтобы точно знать функцию пространственного распределения (ФПР) необходимо, чтобы ось распределения попадала на мозаику и совпадала с осью образа. Иначе могут возникнуть ошибки определения Q_{exp} и R_{exp} . Но отбросить неподходящий образ получается не всегда. Теоретически, если ось ФПР лежит вне мозаики, то количество фотонов должно увеличиваться к границе в сторону оси ФПР. Тогда максимум в образе будет лежать на границе мозаики, а аппроксимация покажет, что ось ФПР лежит вне детектирующей поверхности. Но из-за того, что присутствуют флуктуации в числе фотонов (рис.3.1-3.2), которые сравнимы с числом фотонов в сегменте, то максимум образа может быть смещён от истинного положения. Это приводит к тому, что при аппроксимации этот локальный максимум может ошибочно быть принят за ось ФПР (такой максимум и ось будут называться ложными). Это приводит к неверной форме распределения, а значит значение Q_{exp} и, впоследствии, оценка энергии будет сильно занижена.

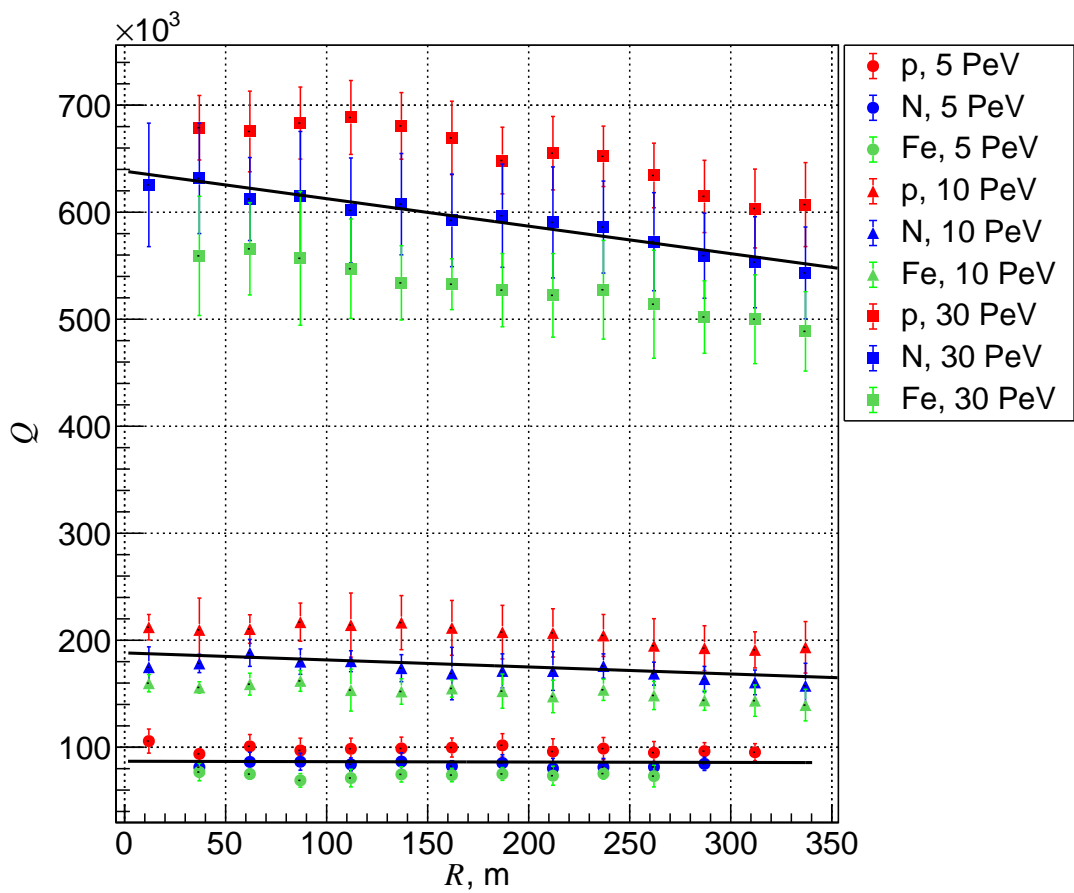


Рис. 2.1: Набор зависимостей полного интеграла аппроксимирующей образ функции от расстояния от оси телескопа до оси ливня на снегу для протона, азота и железа с энергиями 5, 10 и 30 ПэВ.

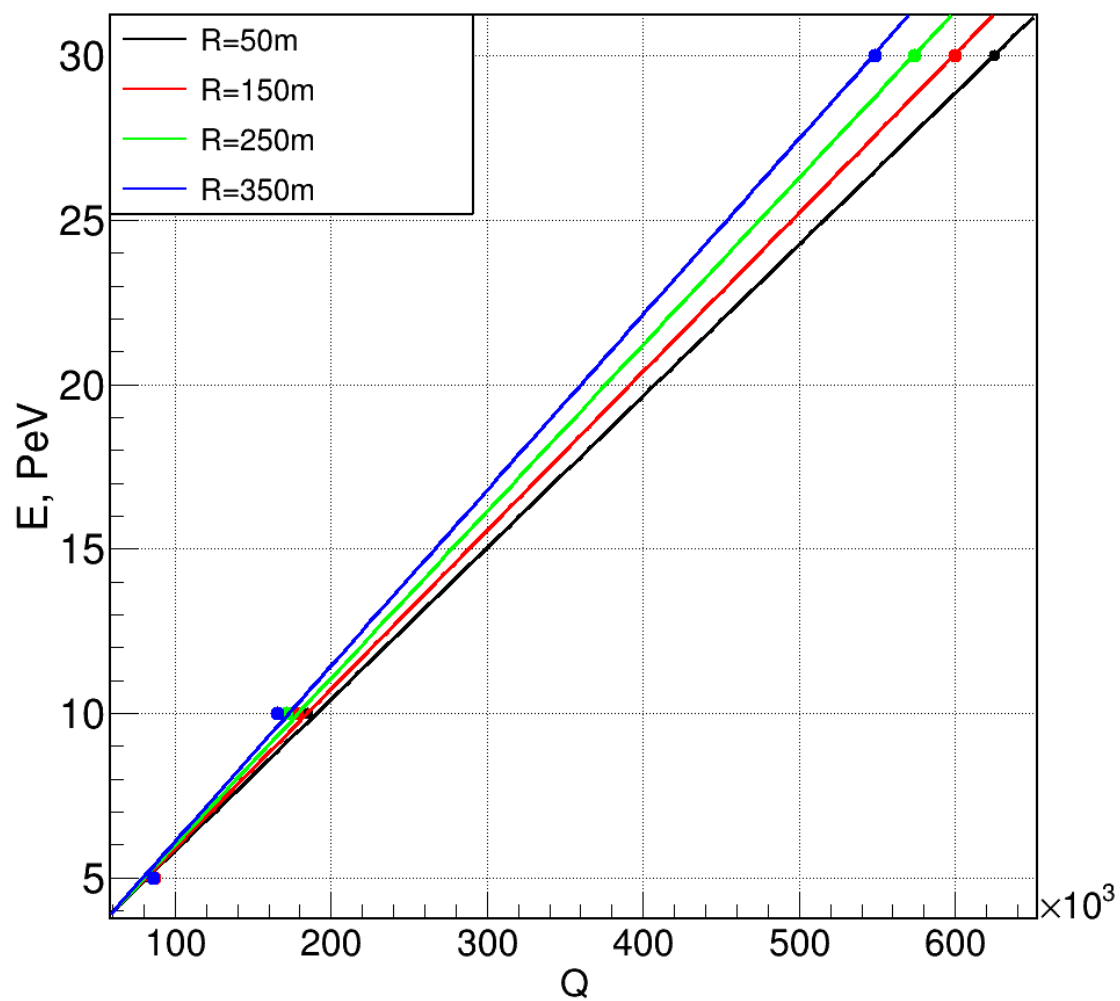


Рис. 2.2: Набор зависимостей энергии от полного интеграла Q для расстояний от оси телескопа до оси ливня равным 50, 150, 250 и 350 метров.

Разработка инструмента, позволяющий отследить этот эффект, является целью данной работы.

2.3 Метод определения ложной оси

Метод определения ложных максимумов разрабатывается на основе модельных данных. Он основывается на поиске границы разделения распределения величины, характеризующей образ, для истинных и ложных максимумов. Граница подбирается так, чтобы отбросить как можно меньше образов с верно определённой осью, и как можно больше с ложной осью.

Для универсальности критерия отбора ищутся способы разделения в относительных единицах, то есть от величины слабо зависящей от параметров первичной частицы. Если такая величина не обнаружена, то ищется связь границы разделения от параметра, измеряемого в эксперименте.

Глава 3. Поиск критерия определения ложного максимума.

Чтобы уменьшить ошибки в оценке энергии был разработан метод определения ложной оси (См. "Материалы и методы"). Согласно методу нужно найти такую величину, которая с минимальной ошибкой определит истинность или ложность оси. В данной главе рассмотрены несколько таких величин.

3.1 Разделение по fcn_{surf} от аппроксимации плоскостью.

Если сравнивать образы с истинной и ложной осью, то можно заметить различия. В случаях с ложной осью количество фотонов находится примерно на одном уровне (рис.3.2). ФПР изменятся медленно. В случае с истинной осью наоборот существует максимум, который сильно выделяется из общей выборки сигнала на мозаике (рис.3.1). Это способствует резкому росту ФПР в области максимума.

При аппроксимации образа плоскостью главной характеристикой точности аппроксимации является fcn_{surf} . Так как fcn_{surf} это χ^2 , то в случае с истинной осью fcn_{surf} будет больше из-за выделяющегося максимума.

На рисунке 3.3 приведены распределения величины для случаев с истинной и ложной осью. Распределения построены по 1000 образов в обоих случаях. Красной линией обозначена граница разделения распределений. Образы с fcn_{surf} левее границы отбрасываются. Данное разделение позволяет отбросить 99,5% ложных при отбрасывании 6% истинных.

3.2 Критерий разделения по относительным величинам.

Разделение по fcn_{surf} достаточно хорошее, однако данная величина является абсолютной, а значит будет меняться с массой и энергией первичной частицы. Поэтому необходимо рассмотреть относительную величину, являющейся соотношением нескольких параметров, характеризующих образ. Граница разделения по этой величине должна не изменяться вообще или изменяться по простым законам с изменением параметров первичной частицы.

Помимо аппроксимации плоскостью происходит аппроксимация образа аксиально-симметричной функцией (1.1), точность которой характеризует fcn .

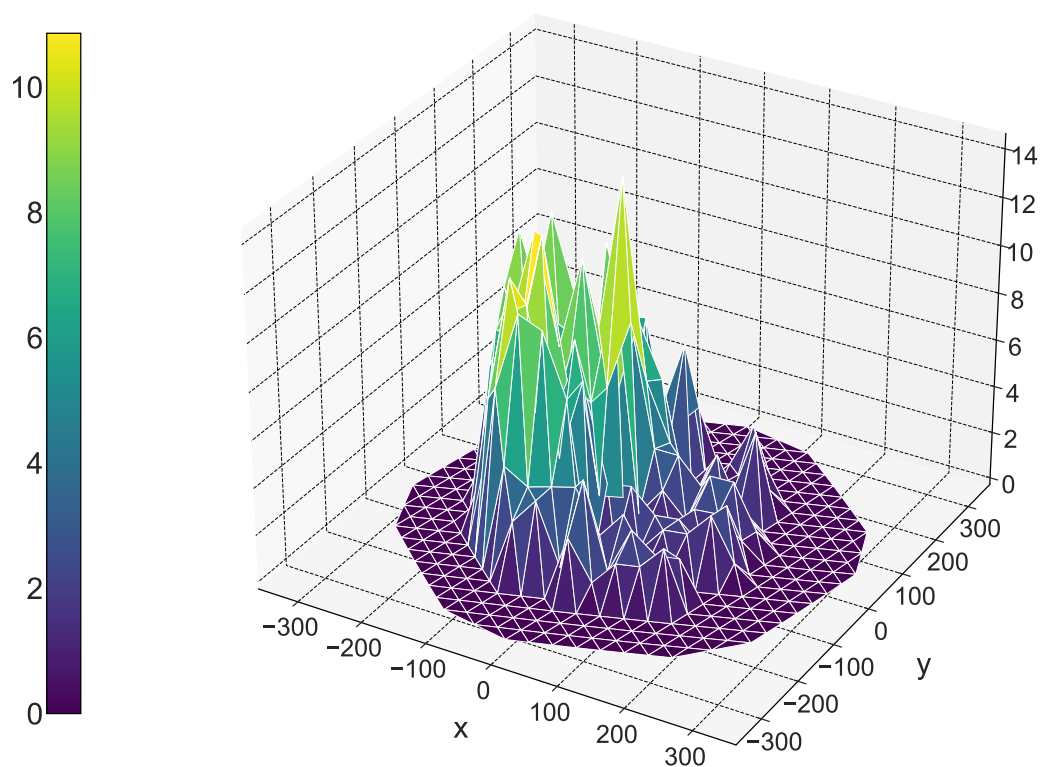


Рис. 3.1: Образ на мозаике с истинным максимумом.

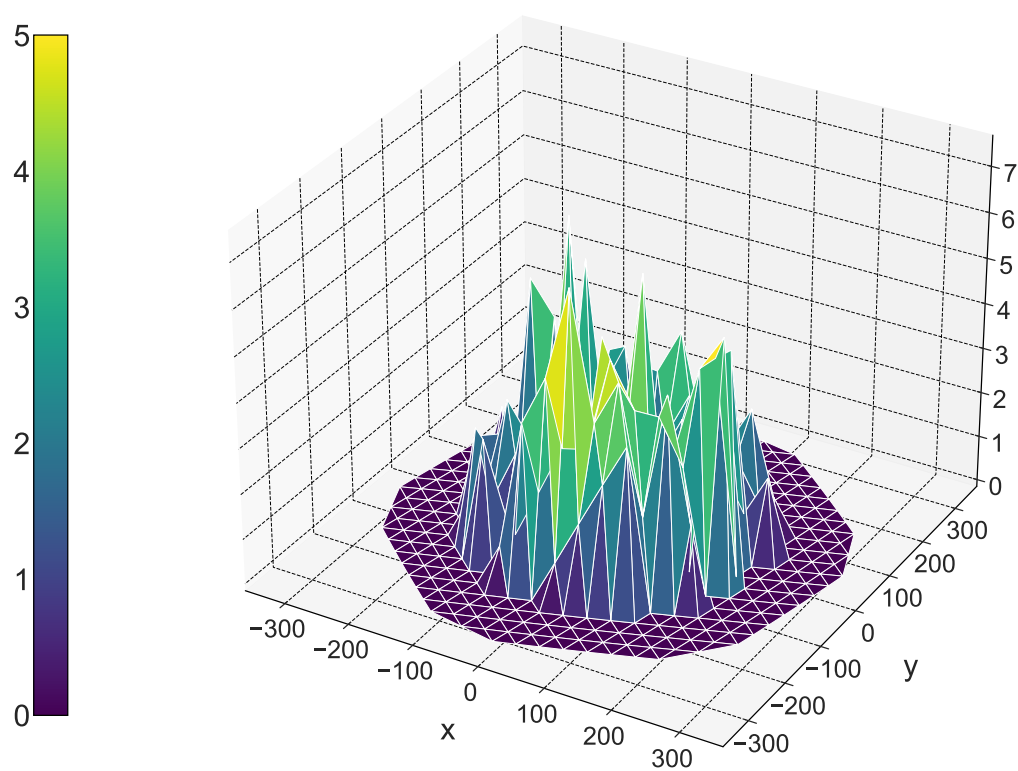


Рис. 3.2: Образ на мозаике с ложным максимумом.

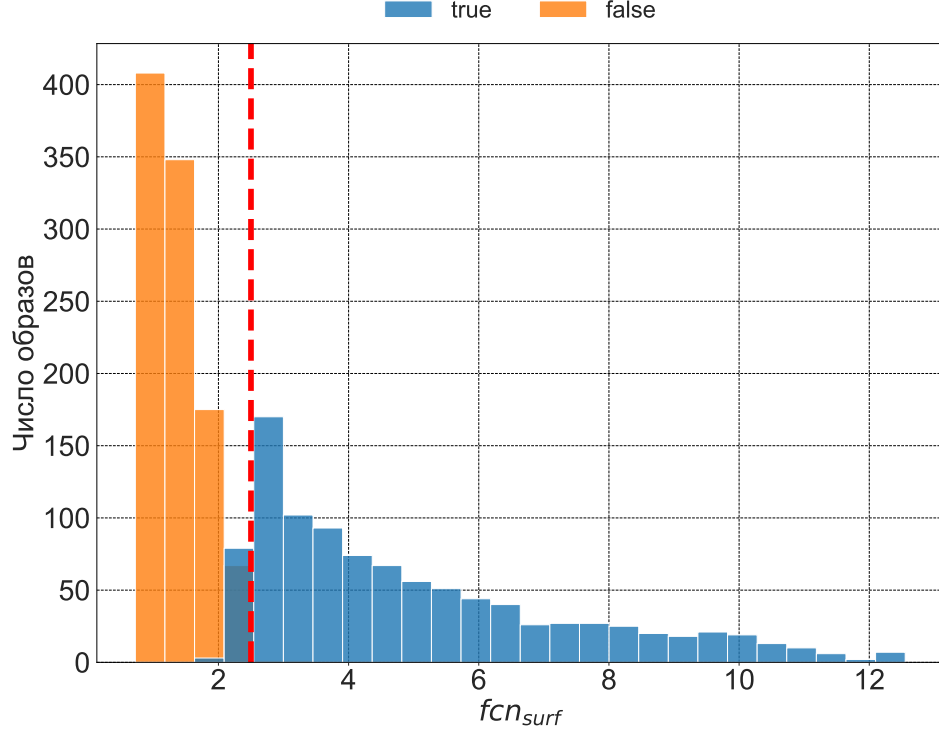


Рис. 3.3: Распределение fcn_{surf} для образов с истинной и ложной осью.

Для поиска относительного критерия были рассмотрены величины:

$$K_1 = \frac{fcn_{surf}}{fcn} \quad (3.1)$$

$$K_2 = \frac{fcn_{surf}}{sum_I} \quad (3.2)$$

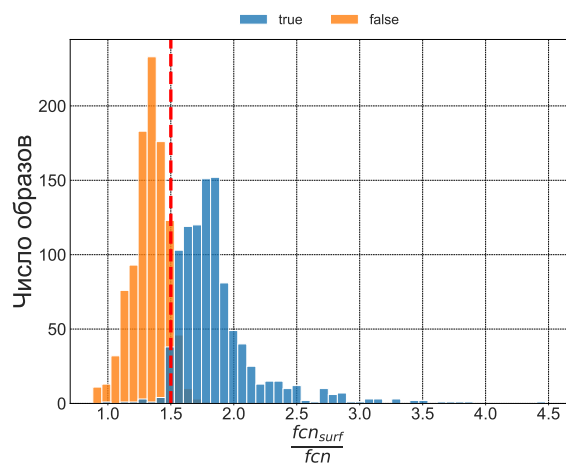
$$K_3 = \left(\frac{fcn_{surf}}{q_1} - \frac{fcn}{q_2} \right) * 100 \quad (3.3)$$

$$K_4 = fcn_{surf} * sum_I, \quad (3.4)$$

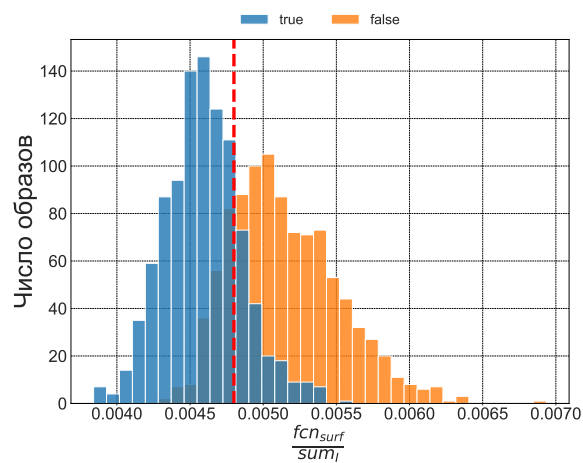
где sum_I - суммарный сигнал в образе, q_1 и q_2 - число степеней свободы при аппроксимации поверхностью и симметричной функцией соответственно.

Распределения данных величин показаны на рисунках 3.4 , а качество критериев приведены в таблице 3.1.

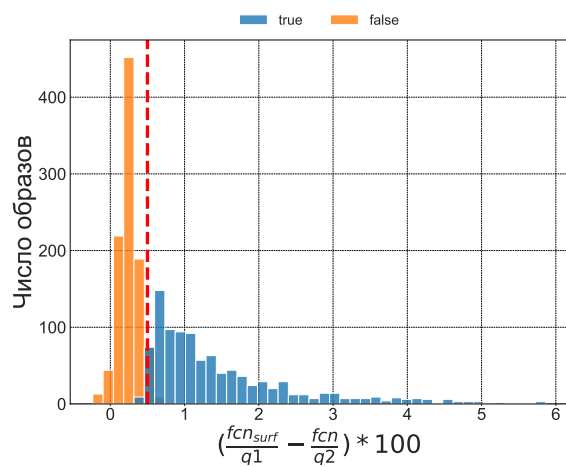
Видно, что лучше всего разделяются величины K_3 и K_4 , позволяющие при минимальных потерях устранить как можно больше неподходящих образов. Но при рассмотрении распределений при разных энергиях видно, что граница распределений смещается с энергией. Согласно методу необходимо найти зависимость этой границы от величины, измеряемой в эксперименте. В связи с



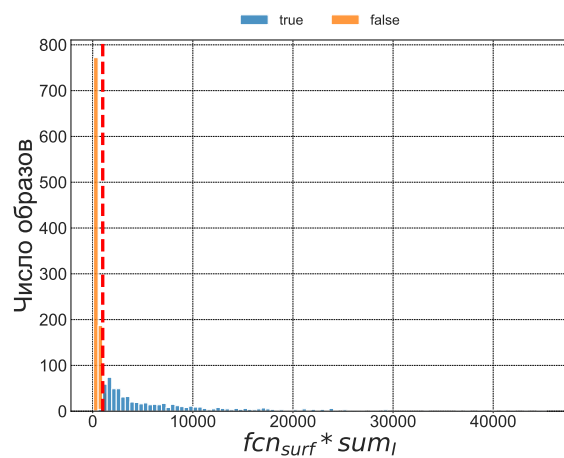
(a)



(b)



(c)



(d)

Рис. 3.4: Распределение значений величин для образов с истинной и ложной осью.

Таблица 3.1: Характеристики критерия разделения по относительной величине

Величина	отброшено истинных	отброшено ложных
$\frac{f_{cn_surf}}{f_{cn}}$	10.3%	96%
$\frac{f_{cn_surf}}{sum_I}$	19%	82%
$(\frac{f_{cn_surf}}{q1} - \frac{f_{cn}}{q2}) * 100$	1,9%	95%
$f_{cn_surf} * sum_I$	0,8%	95%

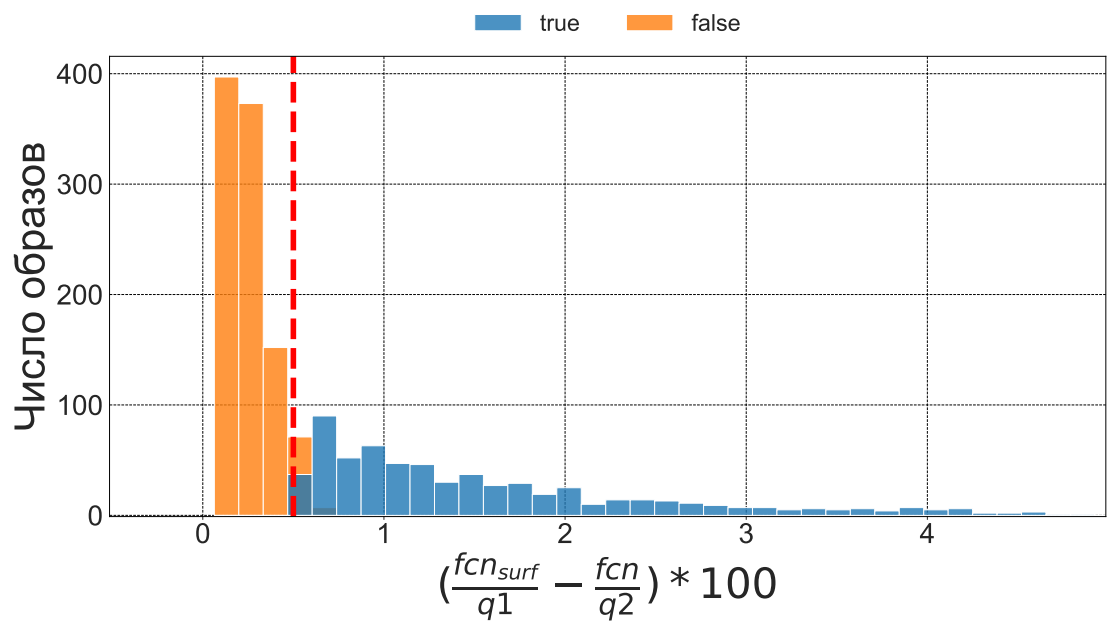
тем, что для величины K_4 эта зависимость имеет сложный вид, то дальше она анализироваться не будет.

На рисунках 3.5 приведены распределения величины K_3 для событий с энергиями 5 ПэВ и 10 ПэВ. Красным на обоих графиках показана граница разделения для 10 ПэВ, что показывает изменение границы разделения с энергией. При изменении массы граница при той же энергии практически идентична.

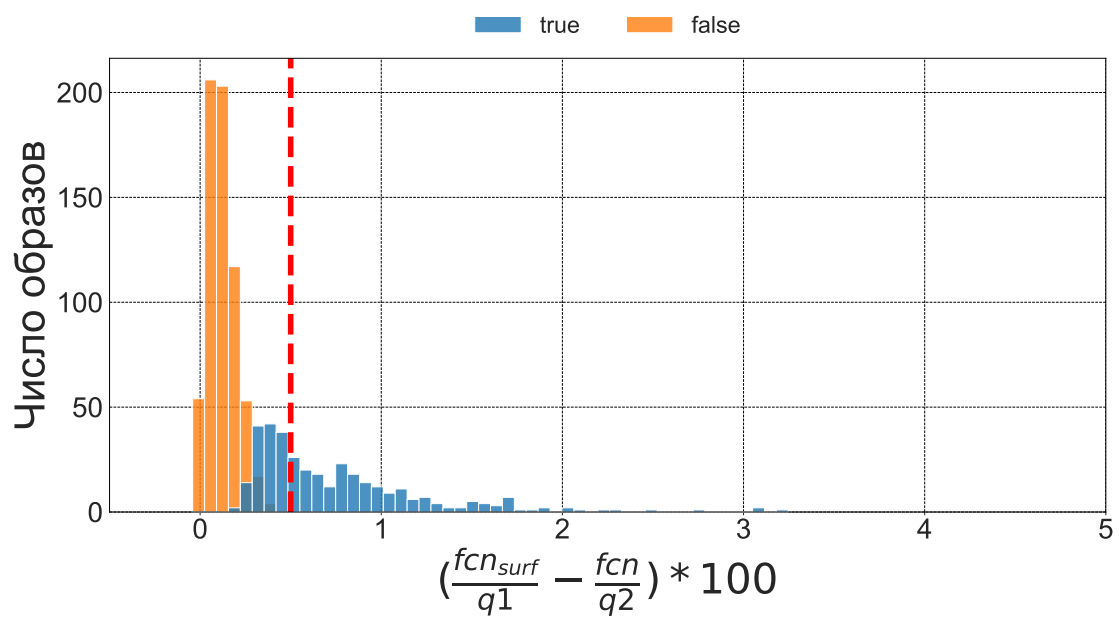
Были рассмотрены разные параметры для построения зависимости границы от величины параметра. Лучшим из них является f_{cn} . Как видно из рисунка 3.6 граница прямо пропорциональна среднему f_{cn} по выборке событий одной энергии.

Если рассматривать границы разделения для разных масс одной энергии, то различия не значительны.

Для проверки работоспособности критерия была искусственно построена выборка из 200 событий с первичной частицей протоном с энергией 10 ПэВ, где в 100 случаях верно определена ось и в 100 — с ошибкой. После применения для этой выборки метода оценки энергии без применения метода определения ложной оси средняя ошибка в оценке энергии составляет 28,5%. Если включить метод определения ложной оси, то средняя ошибка падает до 17%. Метод позволяет устранить 73% ложных максимумов при 3% ошибочно отброшенных истинных.



a)



b)

Рис. 3.5: Распределение величины КЗ а) 10 ПэВ б) 5 ПэВ. Красная линия граница разделения для 10 ПэВ.

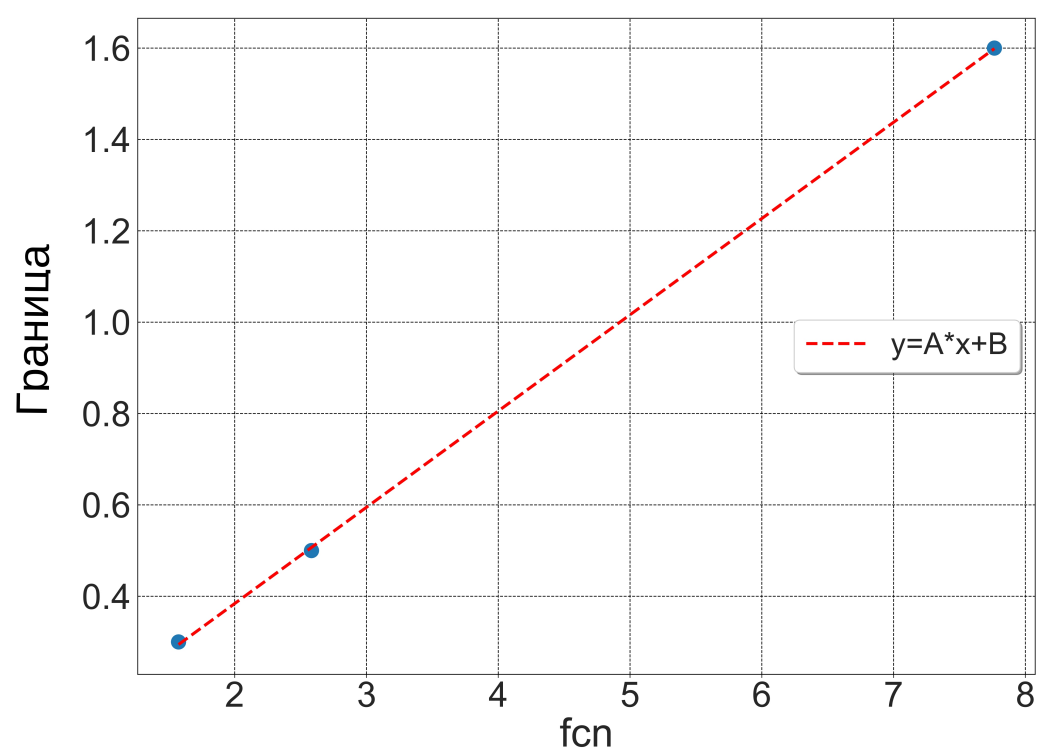


Рис. 3.6: Зависимость границы разделения величины КЗ от среднего fcp.

Выводы

1. Из-за наличия флуктуаций в сигнале аппроксимация образа может принять сильно выделяющийся локальный максимум за ось ФПР.
2. Существует несколько величин, характеризующих образ и получаемых из эксперимента, по которым можно классифицировать истинность или ложность оси. Как и абсолютные, так и найденные относительные величины зависят от первичных параметров частицы. Значит необходима связь рассматриваемых величин с этими параметрами.

3. Для метода определения ложной оси будет использоваться величина

$$\left(\frac{fcn_{surf}}{q1} - \frac{fcn}{q2} \right) * 100,$$

так как: граница разделения по этой величине имеет прямую зависимость от среднего fcn событий одной энергии, а значит, косвенно, и от первичных параметров частицы; распределения этой величины для образов с ложной и истинной осью имеют малую площадь пересечения.

4. Метод определения ложного определения оси позволяет устранить 73% образов с ложным определением оси при 3% ошибочно отброшенных образов с верно определённой осью.

Литература

1. Cosmic-ray energy spectrum and composition up to the ankle: the case for a second Galactic component / S. Thoudam [и др.] // *Astronomy and Astrophysics*. — 2016. — Окт. — Т. 595. — А33. — ISSN 1432-0746. — DOI: 10.1051/0004-6361/201628894. — URL: <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201628894>.
2. Search of high energy photons from sources of radionoise / A. E. Chudakov [и др.] // *Proceedings of 5-th Inter-American Seminar on Cosmic Rays*. Т. 2. — 1962. — С. 44—49.
3. The SPHERE-2 detector for observation of extensive air showers in 1 PeV – 1 EeV energy range / R. Antonov [и др.] // *Astroparticle Physics*. — 2020. — Сент. — Т. 121. — С. 102460. — ISSN 0927-6505. — DOI: 10.1016/j.astropartphys.2020.102460. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2020.102460>.
4. The SPHERE Project: Developing a Technique for Reflected Cherenkov Light / E. Bonvecch [и др.] // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. — 2024. — Апр. — Т. 88. — С. 435—440. — DOI: 10.1134/S1062873823705676.
5. The Tunka Experiment: Towards a 1-km² *EAS Cherenkov Light Array in the Tunka Valley* / N. Budnev [и др.]. — 2005. — Дек.
6. Balloon-borne measurements of the CR energy spectrum in the energy range 10–100 PeV / Р. А. Антонов [и др.] // *Proceeding 27-th International Cosmic Ray Conference*. — 2001.
7. Approaches to Optimization of Experimental Design for Cosmic Ray Mass Composition Studies in the 1–1000 PeV Energy Range / D. V. Chernov [и др.] // *Physics of Atomic Nuclei*. — Road Town, United Kingdom, 2024. — Т. 87, S2. — S319—S338. — ISSN 1063-7788; 1562-692X. — DOI: 10.1134/S1063778824700959.
8. Колодкин Т. А., Галкин В. И. Анализ хода луча отражённого от снега черенковского света широкого атмосферного ливня в телескопе СФЕРА-3 // *Ученые записки физического факультета Московского Университета*. — 2024. — № 4. — С. 2441607. — ISSN 2307-9665.

9. Латыпова В. С., Галкин В. И. Метод восстановления массового состава космических лучей высоких энергий (1-100 ПэВ) для детекторов типа СФЕРА // Ученые записки физического факультета Московского Университета. — 2023. — № 4. — С. 2341604. — ISSN 2307-9665.
10. Heck, K, Knapp, J., Capdevielle, J.N., Shatz, G., Thouw, T. CORSIKA Wissenschaftliche Berichte. Forschungszentrum Karlsruhe FZKA 6019. — 1998.
11. Geant4—a simulation toolkit / S. Agostinelli [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2003. — Т. 506, № 3. — С. 250—303. — ISSN 0168-9002. — DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8). — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203013688>.
12. Software Suite for Modeling Cherenkov Images of Extensive Air Showers in the SPHERE-3 Detector / V. A. Ivanov [и др.]. — 2024. — arXiv: 2410.14921 [astro-ph.IM]. — URL: <https://arxiv.org/abs/2410.14921>.
13. Python Core Team. Python: A dynamic, open source programming language / Python Software Foundation. — 2019. — URL: <https://www.python.org/>.
14. McKinney W. Data Structures for Statistical Computing in Python // Proceedings of the 9th Python in Science Conference / под ред. S. van der Walt, J. Millman. — 2010. — С. 51—56.
15. iminuit - A Python interface to MINUIT [1975CoPhC..10..343J] / P. O. (@piti118) [и др.]. — 2012—. — URL: <https://github.com/iminuit/iminuit>; [Online; accessed 2018.03.05].