

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

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА И КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ
СТОЛКНОВЕНИЙ

КУРСОВАЯ РАБОТА

**«РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОТОКОВ
ГАММА-КВАНТОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ TAIGA»**

Выполнил студент
412 группы
Гоман Георгий Сергеевич

подпись студента

Научный руководитель:
д-р ф.-м. наук Свешникова Л.Г.

подпись научного руководителя

Допущена к защите «____» _____

Зав.кафедрой _____
подпись зав.кафедрой

Москва
2024 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.	3
1. Комплекс TAIGA.	5
1.1. Установка TAIGA-IACT.	5
2. Параметры Хилласа.	7
3. Используемые данные и ограничения.	11
3.1. Данные моделирования.	11
3.2. Экспериментальные данные.	12
3.3. Первостепенный фильтр.	13
4. Использование RF.	16
4.1. Классификация данных.	16
4.2. Регрессия энергии E .	18
4.3. Регрессия угла ϑ .	18
5. Восстановление спектра источников Mrk421 и Mrk501.	20
Выводы.	23
Список использованных источников	24
Приложение 1. Вычисление width и length.	29
Приложение 2. Примеры дней с наблюдениями.	30

ВВЕДЕНИЕ

Астрофизический комплекс TAIGA [1, 2], расположенный в Тункинской долине недалеко от озера Байкал, является одной из самых современных астрофизических установок в области сверхвысоких энергий. Благодаря явлению широких атмосферных ливней (ШАЛ) [3] вторичных частиц, возникающему при взаимодействии космических лучей (КЛ) высоких и сверхвысоких энергий с веществом атмосферы, становится возможным их косвенная регистрация (КЛ до взаимодействия с атмосферой называют первичными космическими лучами (ПКЛ)).

Из-за наличия разного рода космических электромагнитных полей, траектории ПКЛ, имеющих электрический заряд, сильно искривляются, и при изучении источников КЛ одной из первостепенных задач является восстановление энергетического спектра фотонов. Решение этой задачи усложняется в связи с тем, что высоко изотропное излучение космических адронов, как и излучение космических гамма-квантов, является причиной постоянно создаваемых ШАЛ. В связи с данным фактом, еще одной из основных задач наземной гамма-астрономии является восстановление информации об истинном типе первичной частицы (гамма-квант или адрон).

Для решения данных задач в рамках лаборатории наземной гамма астрономии (ЛНГА) была написана программа, в основе которой лежат анализ данных и классическое машинное обучение. Данная работа несет в себе, в основном, практическую значимость, и содержит несколько частей:

- Комплекс TAIGA. Будет представлено краткое описание инструментов комплекса, а также атмосферных Черенковских телескопов (АЧТ), обработанные данные с которых непосредственно используются в программе.
- Параметры Хилласа. В данной части читатель будет ознакомлен с терминами, связанными с особенностями обработки данных с АЧТ.

- Используемые данные и ограничения.
 - Данные моделирования. Будет представлено описание данных для обучения алгоритма случайного леса (Random Forest, RF).
 - Экспериментальные данные. Будут описаны используемые источники и суммарное время наблюдения.
 - Первостепенный фильтр. Будет описано добавление новых переменных, а также ограничение данных.
- Использование RF. В каждом из подпунктов будут описаны гиперпараметры, используемые метрики, а также итоги применения алгоритмов.
 - Классификация данных - восстановление информации о типе первичной частицы.
 - Регрессия энергии E - восстановление энергии первичных гамма-квантов.
 - Регрессия угла ϑ - восстановление угла между исследуемым источником и точкой входа первичного гамма-кванта в атмосферу.
- Восстановление спектра источников Mrk421 и Mrk501.
- Выводы и заключение.

1. КОМПЛЕКС TAIGA.

Обсерватория TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma-ray Astronomy) расположена в Тункинской долине на расстоянии 50 км от озера Байкал. К настоящему времени в составе гамма-обсерватории TAIGA развернуто 120 широкоугольных оптических детекторов TAIGA-HiSCORE (High Sensitivity COsmic Rays and gamma Explorer) и три атмосферных черенковских телескопа (IACTs) установки TAIGA-IACT, а также сцинтилляционная установка TAIGA-Muon.

1.1. Установка TAIGA-IACT.



Рисунок 1 – Телескоп TAIGA-IACT03.

АЧТ регистрируют электронно-фотонную компоненту ливня, в частности - Черенковское излучение. Каждый телескоп TAIGA-IACT (рис. 1) имеет альт-азимутальное крепление, отражатель диаметром 4.3 м и регистрирующую камеру в фокусе. Отражатель состоит из отдельных сферических зеркал диамет-

ром 60 см и имеет общую площадь отражающей поверхности – 8.5 м². Фокусное расстояние телескопов составляет 4.75 м. Дополнительно каждый телескоп оборудован CCD камерой для контроля положения телескопа во время наблюдений. На настоящий момент обсерватория TAIGA включает в себя три атмосферных черенковских телескопа. Камеры TAIGA-IACT01, TAIGA-IACT02 и TAIGA-IACT03 обеспечивают угловой обзор 9.6° и включают в себя матрицы, состоящие из 560 ФЭУ, 595 ФЭУ и 609 ФЭУ (пикселей) соответственно. Каждый пиксель обладает угловым размером 0.36° и оснащен конусом Винстона, увеличивающим площадь светосбора примерно в 4 раза.

Регистрация ШАЛ несколькими телескопами установки TAIGA-IACT (стереоскопический метод) позволяет набирать значительную статистику и с высокой точностью восстанавливать параметры ШАЛ в энергетической области выше 8 ТэВ. Применение гибридного метода регистрации ШАЛ заключается в совместном использовании установок TAIGA-IACT и TAIGA-HiSCORE. Написанная программа, тем не менее, основывается на данных одного АЧТ TAIGA-IACT, т.е. предназначена для обработки данных в моно режиме.

2. ПАРАМЕТРЫ ХИЛЛАСА.

Развитие ШАЛ не может быть зарегистрировано полностью от начала до конца в виду протяженной временной и пространственной структуры. В связи с этим, регистрация ШАЛ с помощью черенковских телескопов представляет из себя не что иное как “фотографирование” фронта ливня (рис. 2). Фотоны преобразуются в фотоэлектроны, и зарегистрированное изображение после некоторых преобразований, связанных непосредственно с выделением полезного сигнала, принимает форму эллипса с характерными параметрами, изображенными на рис. 3.

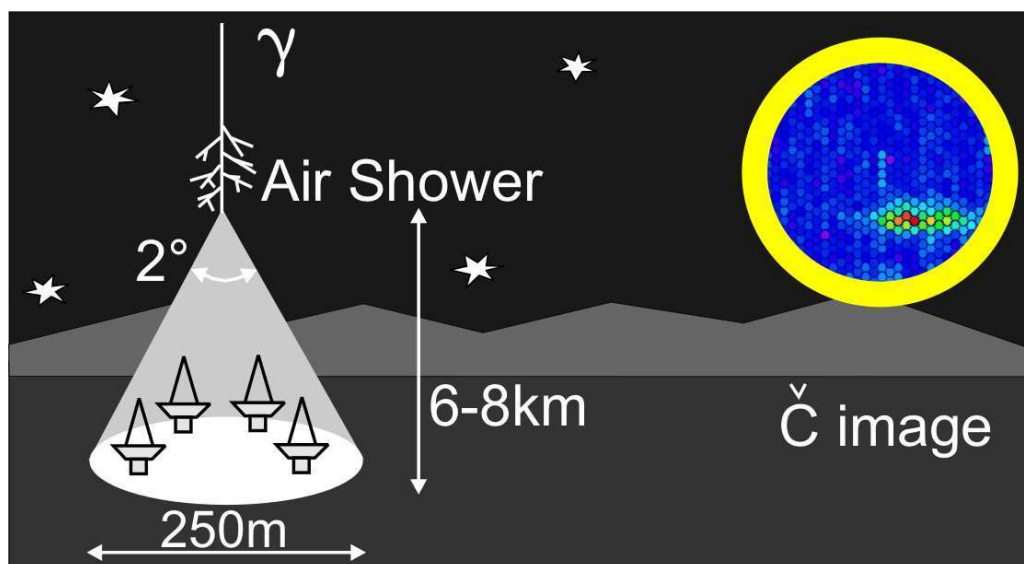


Рисунок 2 – Иллюстративное изображение ШАЛ (слева) и пример фотографии ШАЛ Черенковским телескопом (справа). Иллюстрация взята из [4].

Основными параметрами имиджа¹ являются следующие величины:

- numb_pix - количество пикселей в изображении.
- size - суммарное количество фотоэлектронов в изображении.
- dens - отношение size к numb_pix.

¹Слово “имидж” подразумевает конкретно область с ненулевым количеством фотоэлектронов.

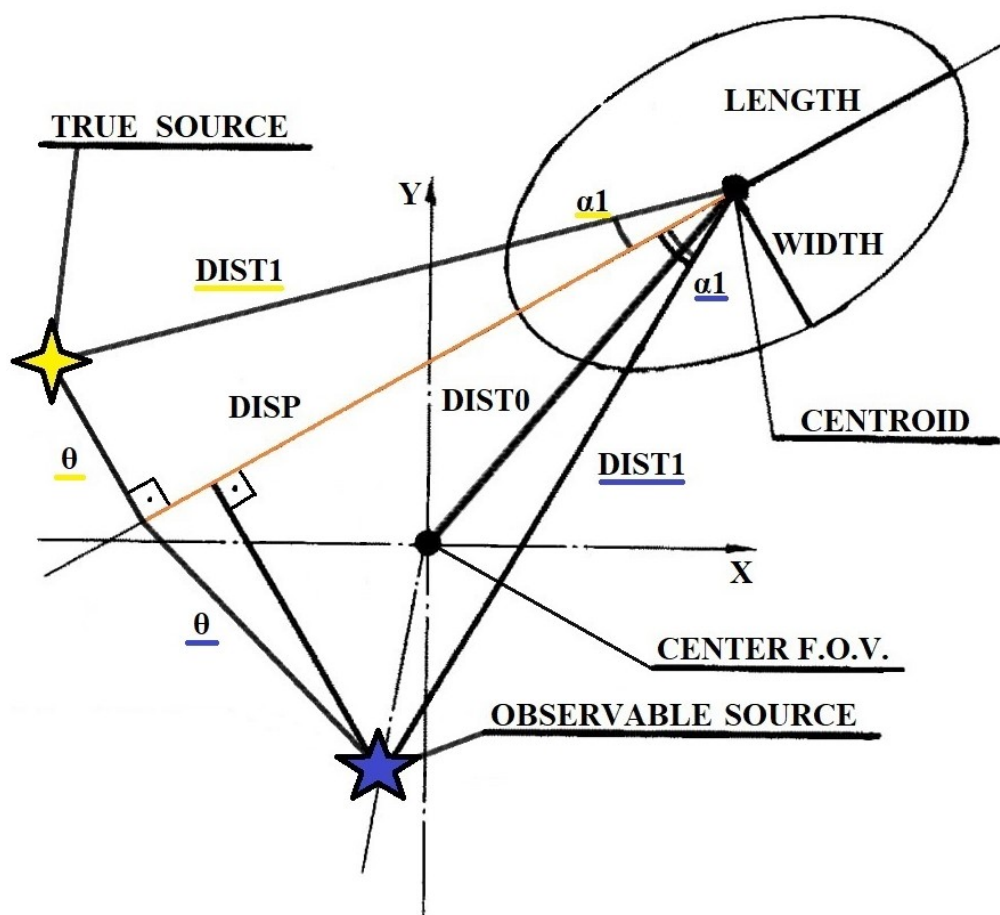


Рисунок 3 – Параметры Хилласа. Параметры dist1 , ϑ и $\alpha1$, имеют разный смысл в моделировании и в эксперименте.

- width - длина малой полуоси эллипса.
- length - длина бóльшей полуоси эллипса.
- w/l - отношение width к length .
- con2 - отношение суммы количества фотоэлектронов в двух пикселях к максимальным количеством фотоэлектронов к size .
- dist0 - расстояние от центра тяжести имиджа до центра камеры.

Способ определения центра тяжести имиджа, а также width и length можно посмотреть в приложении 1.

Параметры dist1 , $\alpha1$ и ϑ имеют разный смысл в файлах с моделированием и в экспериментальных файлах. В моделировании под параметром dist1 подразумевается расстояние от центра тяжести имиджа до истинного источника

первичной частицы (при моделировании данное расстояние известно). Параметр α_1 равен углу между главной осью имиджа и направлением на истинный источник частицы, а параметр ϑ , фактически, равен кратчайшему расстоянию от истинного источника до главной оси имиджа. Параметр disp [5, 6] равен проекции dist1 на главную ось имиджа. В виду сегментированного устройства камеры, значения данных параметров в моделировании отличаются от идеальных значений ($\alpha_1 = 0, \text{disp} = \text{dist1}, \vartheta = 0$). В экспериментальных данных, под параметром dist1 подразумевается расстояние от центра тяжести имиджа до исследуемого источника, параметр α_1 равен углу между главной осью имиджа и направлением на исследуемый источник, а параметр ϑ равен расстоянию от исследуемого источника до точки, отложенной от центра тяжести имиджа на главную ось имиджа на расстояние disp . Параметр ϑ неизвестен для экспериментальных данных.

Вопрос о том, в какую сторону стоит откладывать расстояние disp , т.е. в какой стороне по главной оси находится источник, отчасти решается с помощью введения параметра skewness_1 - третьего центрального момента вдоль главной оси имиджа, определяемого следующим образом:

$$\text{skewness_1} = \frac{\sum_{i=1}^N l_i^3 s_i}{\sum_{i=1}^N s_i},$$

где l_i - координата пикселя по главной оси имиджа. Положительным направлением данной оси считается направление к источнику (к истинному источнику в случае моделирования и к исследуемому источнику в эксперименте). За ноль данной оси принимается центр тяжести имиджа.

Кроме того, одна из особенностей имиджа заключается в том, что истинный источник может находиться с любой стороны от главной оси. Отследить, с какой именно, невозможно - данная неопределенность имеет случайный характер. Поэтому параметр disp фактически отражает расстояние до источника (по крайней мере, при малых углах α_1).

Также введены следующие параметры:

- $kurtosis_l = \frac{\sum_{i=1}^N l_i^4 s_i}{\sum_{i=1}^N s_i}$ - четвертый центральный момент вдоль главной оси имиджа.
- $kurtosis_w = \frac{\sum_{i=1}^N w_i^4 s_i}{\sum_{i=1}^N s_i}$ - четвертый центральный момент вдоль малой оси имиджа. Нулем отсчета, как и для главной оси, устанавливается центр тяжести имиджа.

3. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И ОГРАНИЧЕНИЯ.

3.1. Данные моделирования.

Алгоритм RF¹ относится к категории методов с учителем, подразумевающих наличие данных для обучения. Для этого использовались два файла моделирования Монте-Карло с гамма-квантами и адронами в диапазоне энергий от 1 до 50 ТэВ с наклоном спектра -2.6 и зенитными углами от 0° до 30°.

Количество различных гамма-квантов в программе для моделирования составило ≈ 90000 , а количество адронов ≈ 170000 . Каждая частица “бросалась” над комплексом 10 раз с различными направлениями в круге радиусом 500 метров. При моделировании адронов использовался большой угловой разброс в камере телескопа, равный 5°, в связи с чем доля регистрируемых адронов была небольшой, поэтому для увеличения количества регистрируемых событий использовалось 9 различных позиций телескопов. Разброс гамма-квантов равнялся 1.2°, количество различных позиций телескопов при этом равнялось 4.

В итоге, количество зарегистрированных гамма-квантов Монте-Карло составило $\approx 150000^2$ событий для обоих телескопов IAST01 и IAST03 (для гамма-квантов использовалось одинаковое моделирование, не учитывающее индивидуальных особенностей телескопов). Количество зарегистрированных адронов составило ≈ 150000 событий и ≈ 170000 событий соответственно для IAST01 и IAST03.

Одной из важных характеристик телескопа является эффективная площадь. Она определяется как отношение числа зарегистрированных частиц к числу брошенных частиц, умноженная на площадь круга, в который бросались частицы. Зависимость эффективной площади от энергии представлена на рис. 4.

¹ Полноценное описание алгоритма можно найти в [7].

² Без учета краевых пикселей.

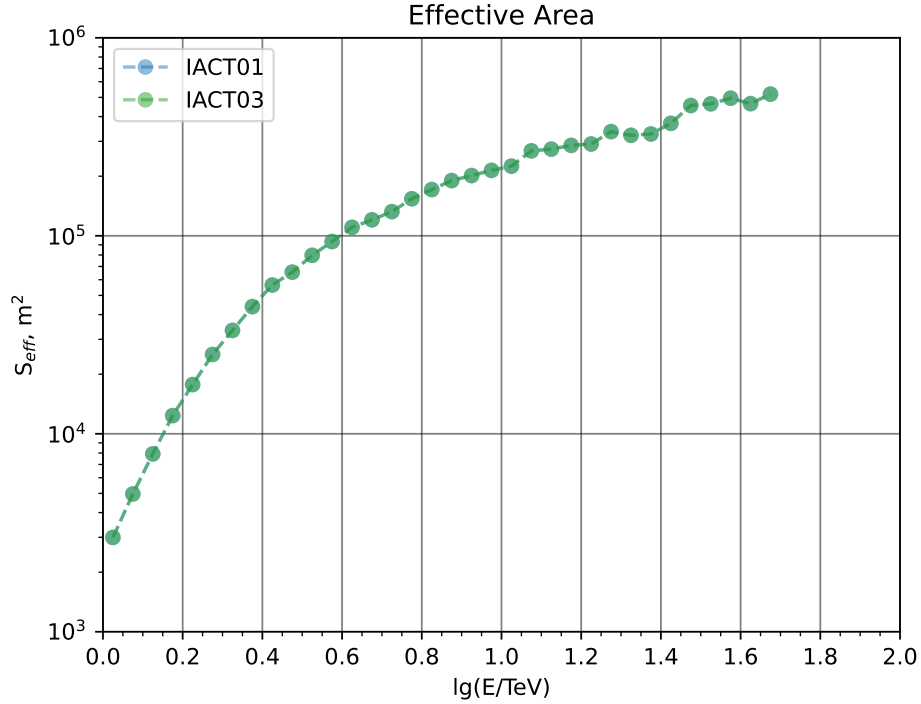


Рисунок 4 – Зависимость эффективной площади от энергии. Т.к. для гамма-квантов на первом и третьем телескопе использовался одинаковый файл, эффективная площадь так же получилась одинаковой.

3.2. Экспериментальные данные.

В качестве экспериментальных данных использовались данные с черенковских телескопов IACT01 и IACT03 за сезон наблюдения с ноября 2022 года по май 2023 года. Исследуемыми источниками являются галактики Маркарян 421 и Маркарян 501 с суммарным временем наблюдения, соответственно, порядка 100 и 40 часов на каждом из телескопов.

Маркарян 421 и Маркарян 501 - блазары, являющиеся мощными источниками гамма-излучения. Изначально Маркарян 421 был открыт в виде источника высокоэнергетического гамма-излучения в 1992 г М. Панчем в обсерватории Уиппл. Маркарян 501 был исследован и занесена в каталог Вениамином Маркаряном в 1974 году. Гамма-излучение от Маркаряна 501 сильно переменное, его спектр обладает двумя горбами. Один из них расположен ниже 1 кэВ в области рентгеновских лучей, другой обладает энергией более 1 ТэВ. В течение

вспышек и выбросов пики излучения возрастают по мощности и частоте [8].

На рисунке 5 изображены частотные дифференциальные спектры зарегистрированных событий при наблюдении Mrk421 и Mrk501 тремя различными телескопами IACT01, IACT02 и IACT03. При построении спектров выбрасывались события, в имиджах которых имелись краевые пиксели. В легендах указаны суммарное время наблюдения и полный темп регистрации для каждого телескопа. Примеры зависимостей темпов регистрации от времени для разных дней приведены в приложении 2.

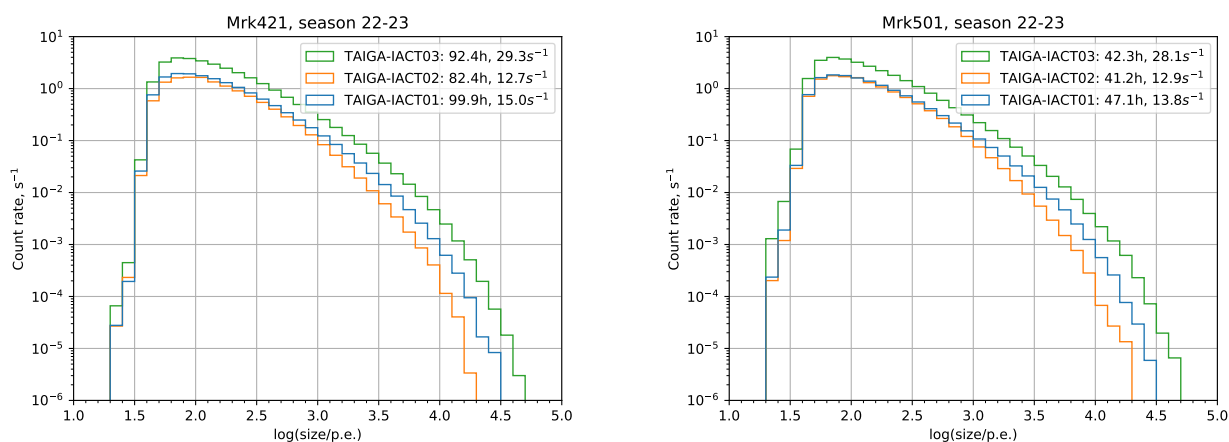


Рисунок 5 – Дифференциальный спектр зарегистрированных событий при наблюдении Mrk421 (слева) и Mrk501 (справа). При построении спектров не учитывались события, имиджи которых имели краевые пиксели телескопа.

3.3. Первостепенный фильтр.

Все данные подвергаются некоторым фильтрам перед использованием их в программе.

Во-первых, все события с краевыми пикселями в имиджах исключаются. Восстановление типа частиц и энергии для таких событий сильно затруднено.

Во-вторых, исключаются все события моделирования, удовлетворяющие условию $skewness_1 < 0$. Причина состоит в том, что $skewness_1$ будет использоваться в on-off методике для восстановления направлений прихода гамма-квантов,

из-за чего неоднозначность в знаке skewness_1 является нежелательной. Учет исключенных событий, вероятно, возможен при введении центральных моментов высшего порядка.

Дальнейшие ограничения нужны для улучшения обучения RF, а также для облегчения выделения гамма-квантов на фоне адронов, и вытекают они непосредственно из графиков совместных распределений между параметрами гамма-квантов (рис. 6).

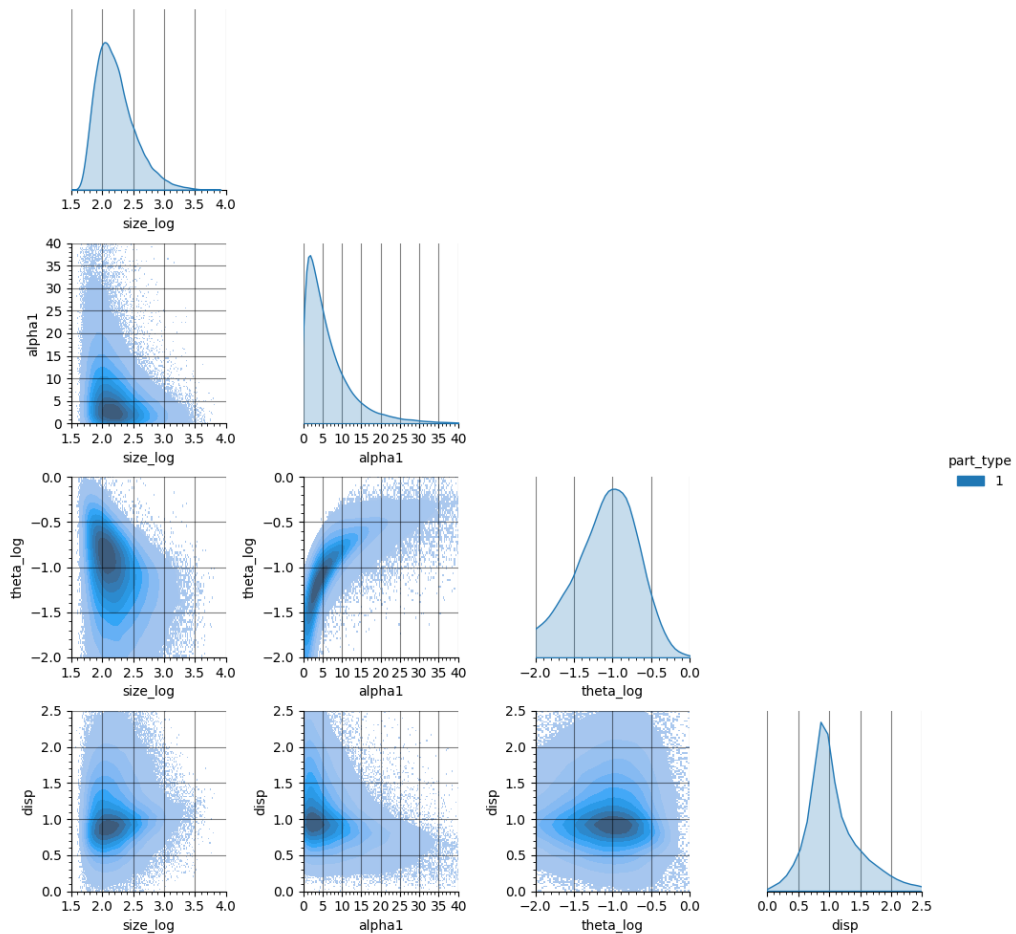


Рисунок 6 – Попарные корреляции между $\lg(\text{size})$, α_1 , $\lg(\vartheta)$ и disp для гамма-квантов.

Следующие ограничения применяются и к экспериментальным данным, и к данным Монте-Карло. Из зависимости disp от α_1 видно, что большая часть гамма-квантов заключена в пределах $0.5 < \text{disp} < 2.1$, $\alpha_1 < 15$. При малых углах $\text{dist}_1 \approx \text{disp}$, поэтому ограничения для disp были наложены на dist_1 . Для параметра size было наложено ограничение $\text{size} > 60$ для улучшения классифи-

кации. Кроме того, были наложены такие ограничения, чтобы все рассматриваемые адроны в моделировании МК и экспериментальные данные лежали в области, покрываемой гамма-квантами МК:

- $60 < \text{size} < 6700$,
- $0.17 < \text{con2} < 0.95$,
- $0.1 < \text{length} < 1.15$,
- $0 < \text{width} < 0.46$.

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ RF.

4.1. Классификация данных.

Первая задача, которую предстоит решить - это задача классификации. Для решения данной задачи использовался класс `RandomForestClassifier` из библиотеки `Scikit-learn` [9].

В качестве используемых свойств событий использовался следующий набор: `numb_pix`, `size`, `con2`, `length`, `width`, `kurtosis_l`, `kurtosis_w`, `skewness_l_abs` (модуль `skewness_l`), `dens`, `w/l`. В данном списке нет параметров, связанных с источником, а именно α_1 , `dist1` и `skewness_l`.

Количество деревьев `n_estimators`, было выставлено равным 100. Меньшее количество будет недостаточно эффективным, а большее количество сильно увеличивает затрачиваемые ресурсы, увеличивая при этом переобучение.

Максимальное количество событий в одном дереве `max_samples` было выставлено равным 10000. Бóльшее количество сильно увеличивает время обучения и так же способствует переобучению.

Для подбора остальных гиперпараметров использовался `GridSearchCV` из всё той же библиотеки (параметр `n_splits` для `StratifiedKFold` был выбран равным 5). Остановимся подробнее на варьируемых гиперпараметрах и их значениях:

- Критерий построения дерева (`criterion`). Есть два варианта: критерий Джини (`gini`), традиционно используемый в деревьях, а также функция потерь перекрестной энтропии (`entropy`).
- Максимальное количество свойств (`max_features`). Фиксирует, сколько случайных параметров событий будет проанализировано при разделении ветви дерева. Выбирается из двух вариантов: корень из количества параметров (`sqrt`) и полное число параметров (`None`).

- Минимальное число событий для разделения внутреннего узла дерева (`min_samples_split`). Основной параметр, контролирующий переобучение. Возможные значения выбирались из следующего списка: 2, 5, 10, 20, 50, 100.
- Минимальное число событий в листовом (конечном) узле дерева. Вводится также для контроля переобучения, возможные значения аналогичны значениям `min_samples_split`.

Метрикой, используемой для подбора гиперпараметров, являлся Average Precision Score, хорошо подходящий для несбалансированных дата-сетов, т.е. имеющих разное количество данных разных классов. В результате, лучшие параметры для двух телескопов следующие: `min_samples_split` = 2 (IACT01) и 20 (IACT03), `min_samples_leaf` = 10 (IACT01) и 5 (IACT03), `max_features` = `sqrt`, `criterion` = `entropy`.

Гистограмма распределения частиц в тестовой выборке по вероятности представлена на рис. 7. Встает вопрос о выборе порога вероятности, отделяющего гамма-кванты от адронов. Таким порогом было выбрано число 0.9, т.е. все частицы, вероятность которых быть гамма-квантом больше 0.9, считаются гамма-квантами.

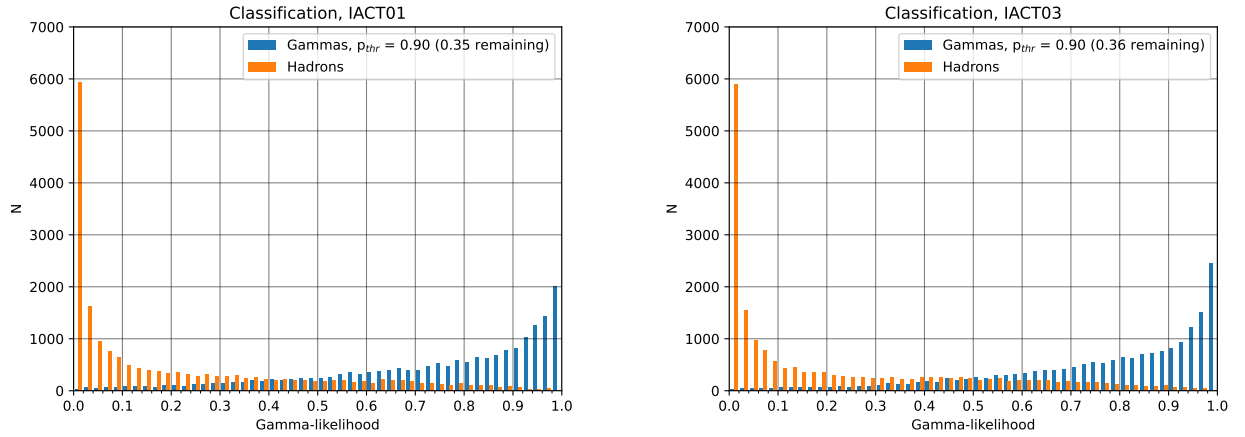


Рисунок 7 – Распределение частиц в тестовой выборке по вероятности для первого и третьего телескопов. Для построения этих графиков количество адронов и количество гамма-квантов нормировалось, т.е. площадь гистограммы адронов равна площади гистограммы гамма-квантов.

4.2. Регрессия энергии E .

Список свойств событий аналогичен случаю классификации. Гиперпараметры аналогичны классификации, за исключением критерия: фридмановская среднеквадратическая ошибка (`friedman_mse`), учитывающая веса событий, а также среднее Пуассоновское отклонение (`poisson`). Также в качестве критерия `GridSearchCV` использовался средний модуль относительной ошибки, чтобы улучшить восстановление порядка энергии.

В результате лучшим набором параметров оказались `min_samples_split = 2`, `min_samples_leaf = 2`, `max_features = None`, `criterion = poisson`.

На рис. 8 представлены результаты регрессии E тестовой выборки.

4.3. Регрессия угла ϑ .

К свойствам событий, используемым в регрессоре, добавляются `dist1` и `$\alpha 1$` . В качестве критерия `GridSearchCV` использовалась среднеквадратическая ошибка.

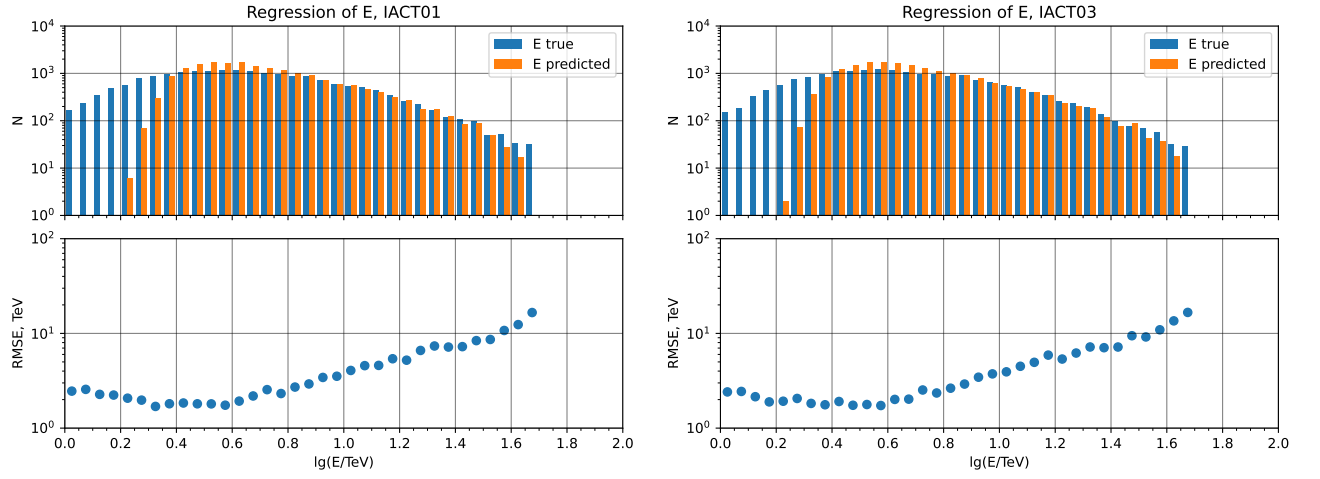


Рисунок 8 – Регрессия энергии для первого телескопа (слева) и третьего телескопа (справа). Нижний график соответствует зависимости средне-квадратической ошибки от энергии.

Лучшие параметры настройки гиперпараметров регрессии следующие:

$\text{min_samples_split} = 5$, $\text{max_features} = \text{None}$, $\text{criterion} = \text{poisson}$, $\text{min_samples_leaf} = 2$.

На рис. 9 представлены результаты регрессии тестовой выборки.

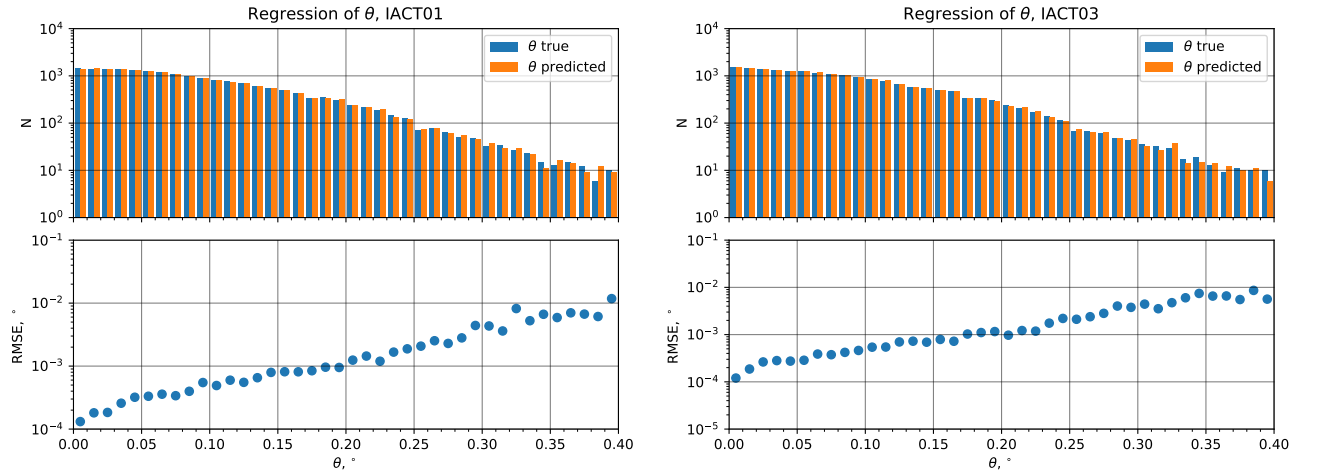


Рисунок 9 – Регрессия ϑ для первого телескопа (слева) и третьего телескопа (справа). Внизу каждого графика указана среднеквадратическая ошибка в зависимости от энергии.

5. ВОССТАНОВЛЕНИЕ СПЕКТРА ИСТОЧНИКОВ MRK421 И MRK501.

Осталось применить классификатор и регрессоры к экспериментальным данным. Самое важное касается регрессии ϑ . Наблюдение источника происходит по следующей схеме: телескоп наводится не на сам источник (on), а на некоторую точку на расстоянии $\approx 1^\circ$. Это положение выбирается таким образом, чтобы антиисточник (off) (точка, симметричная источнику относительно центра камеры) находился в пустой точке неба. Каждый гамма-квант рассматривается относительно источника и антиисточника: если $\vartheta_{\text{on}} < \vartheta_{\text{off}}$, то гамма-квант приписывается к источнику, иначе - наоборот. После этого, распределения по ϑ^2 сравниваются для источника и антиисточника, и для каждого значения ϑ^2 считается значимость:

$$\sigma(\vartheta^2) = \frac{N_{\text{on}}(\vartheta_{\text{on}}^2 < \vartheta^2) - N_{\text{off}}(\vartheta_{\text{off}}^2 < \vartheta^2)}{\sqrt{N_{\text{on}}(\vartheta_{\text{on}}^2 < \vartheta^2) + N_{\text{off}}(\vartheta_{\text{off}}^2 < \vartheta^2)}}.$$

Параметр skewness_1 для off-событий может изменить знак, так как антиисточник может находиться по другую сторону от центра тяжести по главной оси. Именно поэтому для моделирования использовался фильтр skewness_1 > 0, чтобы для экспериментальных событий не было неоднозначности при определении направления источника. Фильтры по dist1 и $\alpha 1$, соответственно, преобразуются для on- и off-событий. Итоговые фильтры для параметров, зависящих от источника:

- On-события: skewness_1_on > 0, $0.5 < \text{dist1_on} < 2.1$, $\alpha 1_{\text{on}} < 15$.
- Off-события: skewness_1_off > 0, $0.5 < \text{dist1_off} < 2.1$, $\alpha 1_{\text{off}} < 15$.

Касательно восстановления спектра, ищется $\vartheta_{\text{thr}}^2 = \text{argmax}(\sigma(\vartheta^2))$ при $\vartheta^2 \leq 0.1^\circ$. Данное значение выбрано исходя из рис. 6: основная часть гамма-квантов имеет $\vartheta \lesssim 10^{-0.5}^\circ$, т.е. $\vartheta^2 \lesssim 0.1^\circ$. При этом шаг бина по ϑ^2 выбирается исходя рис. 9: максимальная ошибка ϑ на указанном промежутке $\approx 0.5 \cdot 10^{-3}^\circ$, тогда

шаг бина $2\vartheta_{\text{err}} \cdot 10^{-0.5\circ} \approx 2.5 \cdot 10^{-3} \circ^2$.

Все события, удовлетворяющие условию $\vartheta^2 < \vartheta_{\text{thr}}^2$, записываются, соответственно, в окончательный спектр on- или off-источника. Строя гистограммы по энергии для этих событий и вычитая off-гистограмму из on-гистограммы, с учетом эффективной площади и всех ограничений, подавляющих поток гамма-квантов, получаем истинный спектр источника. На рис. 10 изображены данные об избытке и значимости.

Спектр восстанавливается, исходя из рисунка 8, а именно с помощью линейного преобразования. Количеству событий n_i из тестовой выборки с восстановленной энергией в i -м бине соответствует n_{ij} частиц тестовой выборки с истинной энергией в j -м бине. Таким образом, имея спектр восстановленной энергии для экспериментальных событий, восстанавливается реальный спектр энергий. Данные о восстановленных спектрах изображены на рис. 11.

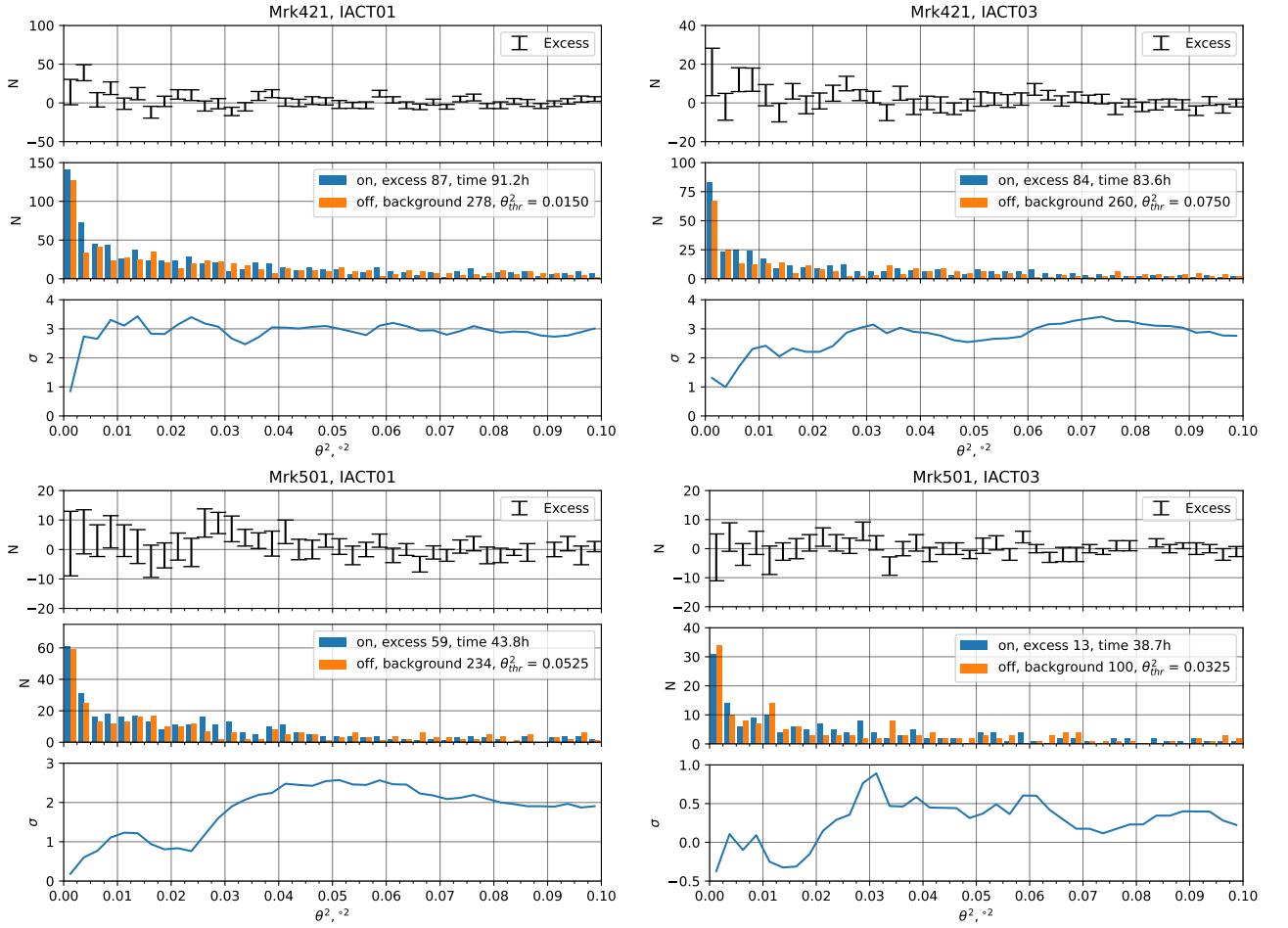


Рисунок 10 – Избытки, распределения on- и off- событий по θ^2 , значимость. Первый телескоп, Mrk421 (слева сверху); третий телескоп, Mrk421 (справа сверху); первый телескоп, Mrk501 (слева снизу); третий телескоп, Mrk501 (справа снизу).

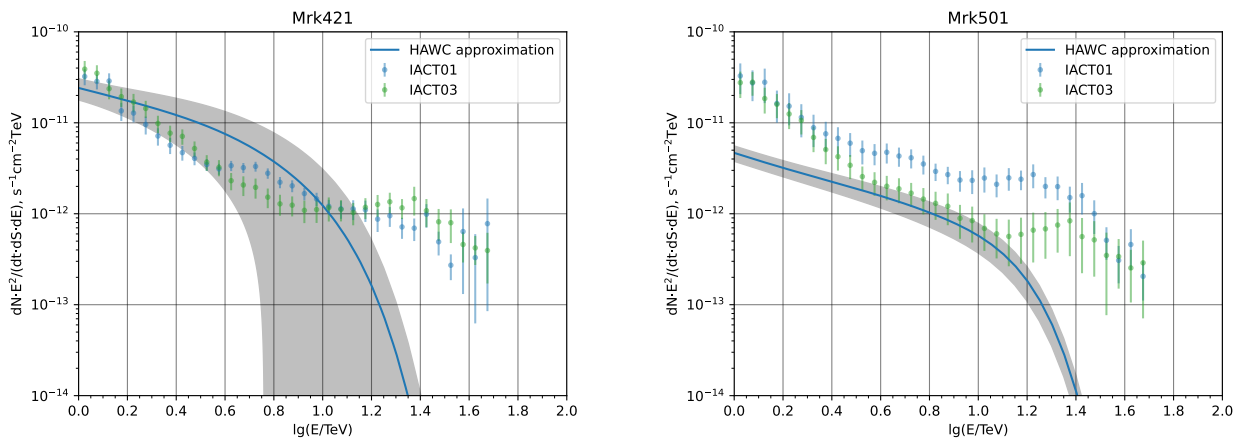


Рисунок 11 – Восстановленный спектр Mrk421 (слева) и Mrk501(справа). Аппроксимированный спектр взят из [10].

ВЫВОДЫ

Приведенный метод восстановления спектра оказался весьма эффективным. Общий вид спектров оказался близок к ранее полученным данным [10]. При учете индивидуальных особенностей телескопов и моделировании новых данных, регрессия энергии покажет более эффективные результаты, а спектр будет более точным.

Погрешность при регрессии ϑ мала, что доказывает эффективность ограничения и использования параметра `skewness_1`. Как уже упоминалось ранее, учет высших центральных моментов, а также, возможно, использование нейронных сетей, увеличат долю используемых в анализе гамма-квантов и приведет к увеличению статистики. Кроме того, в данной работе не рассматривался метод с использованием нескольких off-источников, увеличивающий значимость регистрации.

В заключение хотелось бы отметить используемые, но ранее не упомянутые библиотеки Python: NumPy [11], SciPy [12], Matplotlib [13], Seaborn [14], pandas [15].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] N. M. Budnev, I. Astapov, P. Bezyazeev, E. Bonvec, A. Borodin, A. Bulan, D. Chernov, A. Chiavassa, A. Dyachok, A. Gafarov, A. Garmash, V. Grebenyuk, E. Gress, O. Gress, T. Gress, A. Grinyuk, O. Grishin, A. D. Ivanova, A. L. Ivanova, N. Kalmykov, V. Kindin, S. Kiryuhin, R. Kokoulin, K. Kompaniets, E. Korosteleva, V. Kozhin, E. Kravchenko, A. Kryukov, L. Kuzmichev, A. Lagutin, M. Lavrova, Y. Lemeshev, B. Lubsandorzhiev, N. Lubsandorzhiev, A. Lukanov, D. Lukyantsev, S. Malakhov, R. Mirgazov, R. Monkhoev, E. Osipova, A. Pakhorukov, L. Pankov, A. Pan, A. Panov, A. Petrukhin, I. Poddubnyi, D. Podgrudkov, V. Ponomareva, E. Popova, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, A. Pushnin, R. Raikin, A. Razumov, G. Rubtsov, E. Ryabov, V. Samoliga, A. Satyshev, A. Silaev, A. Silaev, A. Sidorenkov, A. Skurikhin, A. Sokolov, L. Sveshnikova, V. Tabolenko, L. Tkachev, A. Tanaev, M. Ternovoy, R. Togoo, N. Ushakov, A. Vaidyanathan, P. Volchugov, N. Volkov, D. Voronin, A. Zagorodnikov, D. Zhurov, and I. Yashin. Taiga – an advanced hybrid detector complex for astroparticle physics and high energy gamma-ray astronomy, 2022.
- [2] П.А. Волчугов. Астрофизический комплекс в Тункинской долине: от установки Тунка-133 к гамма-обсерватории taiga. *Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та.*, (4), 2019.
- [3] Е.Г. Бережко. *Введение в физику космоса: Учебное пособие*. Якутск, Россия, 2014.
- [4] Felix A Aharonian. *Very high energy cosmic gamma radiation: A crucial window on the extreme universe*. World Scientific Publishing, Singapore, Singapore, July 2004.

- [5] Eva Domingo-Santamaría. The disp analysis method for point-like or extended gamma source searches/studies with the magic telescope. 2005.
- [6] Daniel Kranich and Luisa Sabrina Stark. An new method to determine the arrival direction of individual air showers with a single air cherenkov telescope. *International Cosmic Ray Conference*, pages 3023–, 07 2003.
- [7] Gilles Louppe. Understanding random forests: From theory to practice, 2015.
- [8] V. A. Acciari, T. Arlen, T. Aune, M. Beilicke, W. Benbow, M. Böttcher, D. Boltuch, S. M. Bradbury, J. H. Buckley, V. Bugaev, A. Cannon, A. Cesarini, L. Ciupik, W. Cui, R. Dickherber, C. Duke, M. Errando, A. Falcone, J. P. Finley, G. Finnegan, L. Fortson, A. Furniss, N. Galante, D. Gall, S. Godambe, J. Grube, R. Guenette, G. Gyuk, D. Hanna, J. Holder, D. Huang, C. M. Hui, T. B. Humensky, A. Imran, P. Kaaret, N. Karlsson, M. Kertzman, D. Kieda, A. Konopelko, H. Krawczynski, F. Krennrich, A. S. Madhavan, G. Maier, S. McArthur, A. McCann, P. Moriarty, R. A. Ong, A. N. Otte, D. Pandel, J. S. Perkins, A. Pichel, M. Pohl, J. Quinn, K. Ragan, L. C. Reyes, P. T. Reynolds, E. Roache, H. J. Rose, M. Schroedter, G. H. Sembroski, D. Steele, S. P. Swordy, M. Theiling, S. Thibadeau, A. Varlotta, V. V. Vassiliev, S. Vincent, S. P. Wakely, J. E. Ward, T. C. Weekes, A. Weinstein, T. Weisgarber, D. A. Williams, M. Wood, B. Zitzer, J. Aleksić, L. A. Antonelli, P. Antoranz, M. Backes, J. A. Barrio, D. Bastieri, J. Becerra González, W. Bednarek, A. Berdyugin, K. Berger, E. Bernardini, A. Biland, O. Blanch, R. K. Bock, A. Boller, G. Bonnoli, P. Bordas, D. Borla Tridon, V. Bosch-Ramon, D. Bose, I. Braun, T. Bretz, M. Camara, E. Carmona, A. Carosi, P. Colin, E. Colombo, J. L. Contreras, J. Cortina, S. Covino, F. Dazzi, A. De Angelis, E. De Cea del Pozo, B. De Lotto, M. De Maria, F. De Sabata, C. Delgado Mendez, A. Diago Ortega, M. Doert, A. Domínguez, D. Dominis Prester, D. Dorner, M. Doro, D. Elsaesser, M. Errando, D. Ferenc, M. V. Fonseca, L. Font, R. J. García

López, M. Garczarczyk, M. Gaug, G. Giavitto, N. Godinović, D. Hadasch, A. Herrero, D. Hildebrand, D. Höhne-Mönch, J. Hose, D. Hrupec, T. Jogler, S. Klepser, T. Krähenbühl, D. Kranich, J. Krause, A. La Barbera, E. Leonardo, E. Lindfors, S. Lombardi, F. Longo, M. López, E. Lorenz, P. Majumdar, M. Makariev, G. Maneva, N. Mankuzhiyil, K. Mannheim, L. Maraschi, M. Mariotti, M. Martínez, D. Mazin, M. Meucci, J. M. Miranda, R. Mirzoyan, H. Miyamoto, J. Moldón, A. Moralejo, D. Nieto, K. Nilsson, R. Orito, I. Oya, R. Paoletti, J. M. Paredes, S. Partini, M. Pasanen, F. Pauss, R. G. Pegna, M. A. Perez-Torres, M. Persic, L. Peruzzo, J. Pochon, F. Prada, P. G. Prada Moroni, E. Prandini, N. Puchades, I. Puljak, I. Reichardt, R. Reinthal, W. Rhode, M. Ribó, J. Rico, M. Rissi, S. Rügamer, A. Saggion, K. Saito, T. Y. Saito, M. Salvati, M. Sánchez-Conde, K. Satalecka, V. Scalzotto, V. Scapin, C. Schultz, T. Schweizer, M. Shayduk, S. N. Shore, A. Sierpowska-Bartosik, A. Sillanpää, J. Sitarek, D. Sobczynska, F. Spanier, S. Spiro, A. Stamerra, B. Steinke, J. Storz, N. Strah, J. C. Struebig, T. Suric, L. Takalo, F. Tavecchio, P. Temnikov, T. Terzić, D. Tescaro, M. Teshima, D. F. Torres, H. Vankov, R. M. Wagner, Q. Weitzel, V. Zabalza, F. Zandanel, R. Zanin, D. Paneque, and M. Hayashida. Spectral energy distribution of markarian 501: Quiescent state versus extreme outburst. *The Astrophysical Journal*, 729(1):2, February 2011.

- [9] F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg, J. Vanderplas, A. Passos, D. Cournapeau, M. Brucher, M. Perrot, and E. Duchesnay. Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12:2825–2830, 2011.
- [10] A. Albert, R. Alfaro, C. Alvarez, J. R. Angeles Camacho, J. C. Arteaga-Velázquez, K. P. Arunbabu, D. Avila Rojas, H. A. Ayala Solares, V. Baghmany, E. Belmont-Moreno, K. S. Caballero-Mora, T. Capistrán, A. Carramiñana, S. Casanova, U. Cotti, J. Cotzomi, S. Coutiño de León,

E. De la Fuente, R. Diaz Hernandez, M. A. DuVernois, M. Durocher, J. C. Díaz-Vélez, K. Engel, C. Espinoza, K. L. Fan, M. Fernández Alonso, N. Fraija, D. Garcia, J. A. García-González, F. Garfias, M. M. González, J. A. Goodman, J. P. Harding, B. Hona, D. Huang, F. Hueyotl-Zahuantitla, P. Hüntemeyer, A. Iriarte, V. Joshi, A. Lara, W. H. Lee, J. Lee, H. León Vargas, J. T. Linneman, A. L. Longinotti, G. Luis-Raya, K. Malone, O. Martinez, J. Martínez-Castro, J. A. Matthews, P. Miranda-Romagnoli, E. Moreno, M. Mostafá, A. Nayerhoda, L. Nellen, M. Newbold, R. Noriega-Papaqui, A. Peisker, Y. Pérez Araujo, E. G. Pérez-Pérez, C. D. Rho, D. Rosa-González, H. Salazar, F. Salesa Greus, A. Sandoval, M. Schneider, J. Serna-Franco, A. J. Smith, R. W. Springer, K. Tollefson, I. Torres, R. Torres-Escobedo, F. Ureña-Mena, L. Villaseñor, X. Wang, T. Weisgarber, E. Willox, H. Zhou, and C. de León. Long-term spectra of the blazars mrk 421 and mrk 501 at tev energies seen by hawc. *The Astrophysical Journal*, 929(2):125, April 2022.

- [11] Charles R. Harris, K. Jarrod Millman, Stéfan J. van der Walt, Ralf Gommers, Pauli Virtanen, David Cournapeau, Eric Wieser, Julian Taylor, Sebastian Berg, Nathaniel J. Smith, Robert Kern, Matti Picus, Stephan Hoyer, Marten H. van Kerkwijk, Matthew Brett, Allan Haldane, Jaime Fernández del Río, Mark Wiebe, Pearu Peterson, Pierre Gérard-Marchant, Kevin Sheppard, Tyler Reddy, Warren Weckesser, Hameer Abbasi, Christoph Gohlke, and Travis E. Oliphant. Array programming with NumPy. *Nature*, 585(7825):357–362, September 2020.
- [12] Pauli Virtanen, Ralf Gommers, Travis E. Oliphant, Matt Haberland, Tyler Reddy, David Cournapeau, Evgeni Burovski, Pearu Peterson, Warren Weckesser, Jonathan Bright, Stéfan J. van der Walt, Matthew Brett, Joshua Wilson, K. Jarrod Millman, Nikolay Mayorov, Andrew R. J. Nelson, Eric Jones, Robert Kern, Eric Larson, C J Carey, İlhan Polat, Yu Feng, Eric W. Moore, Jake VanderPlas, Denis Laxalde, Josef Perktold, Robert Cimrman, Ian Henriksen,

- E. A. Quintero, Charles R. Harris, Anne M. Archibald, Antônio H. Ribeiro, Fabian Pedregosa, Paul van Mulbregt, and SciPy 1.0 Contributors. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, 17:261–272, 2020.
- [13] J. D. Hunter. Matplotlib: A 2d graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3):90–95, 2007.
- [14] Michael Waskom, Olga Botvinnik, Drew O’Kane, Paul Hobson, Saulius Lukauskas, David C Gemperline, Tom Augspurger, Yaroslav Halchenko, John B. Cole, Jordi Warmerhoven, Julian de Ruiter, Cameron Pye, Stephan Hoyer, Jake Vanderplas, Santi Villalba, Gero Kunter, Eric Quintero, Pete Bachant, Marcel Martin, Kyle Meyer, Alistair Miles, Yoav Ram, Tal Yarkoni, Mike Lee Williams, Constantine Evans, Clark Fitzgerald, Brian, Chris Fonnesbeck, Antony Lee, and Adel Qalieh. mwaskom/seaborn: v0.8.1 (september 2017), September 2017.
- [15] The pandas development team. pandas-dev/pandas: Pandas, February 2020.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ВЫЧИСЛЕНИЕ WIDTH И LENGTH.

Координаты взвешенного центра тяжести считаются по следующим формулам:

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^N x_i s_i}{\sum_{i=1}^N s_i}, \quad y_c = \frac{\sum_{i=1}^N y_i s_i}{\sum_{i=1}^N s_i},$$

где x_i и y_i - координаты i -го пикселя, а s_i - количество фотоэлектронов в i -м пикселе. В свою очередь, width и length считаются как корни из собственных значений следующей матрицы:

$$M = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} \end{pmatrix},$$

где

$$\sigma_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^N (a_i - a_s)(b_i - b_s)s_i}{\sum_{i=1}^N s_i}.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ПРИМЕРЫ ДНЕЙ С НАБЛЮДЕНИЯМИ.

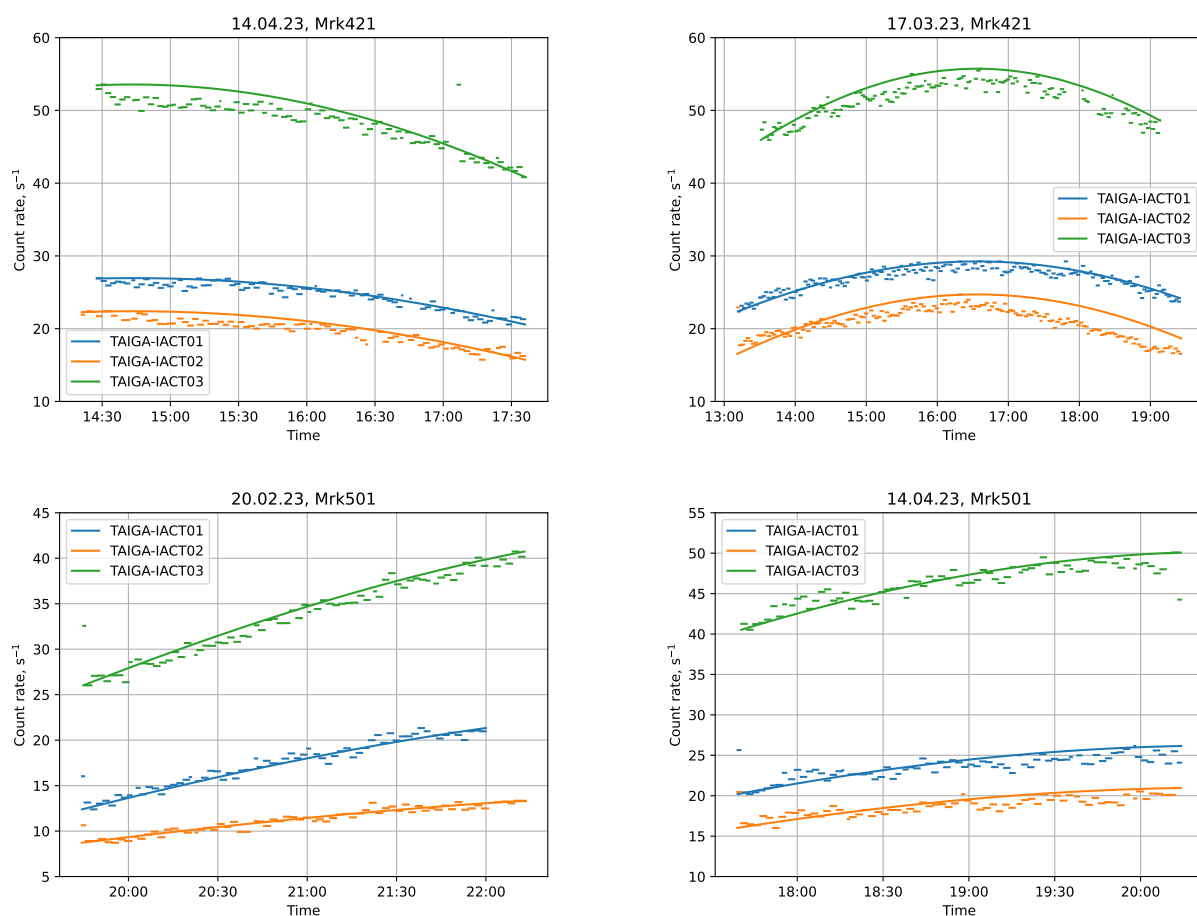


Рисунок 12 – Примеры зависимостей частоты регистрации событий от времени для различных дней. Ступеньки соответствуют значениям частоты от времени (наблюдения разделяются на порции по 2 минуты, в течение которых темп счета считается постоянным). Сплошная линия соответствует грубой аппроксимации косинуса зенитного угла, отражающая зависимость интенсивности излучения источника от зенитного угла и, как следствие, от времени.