

Анизотропия космических лучей сверхвысоких энергий по данным эксперимента KASCADE

Работу выполнил
студент 643 группы
Шинкевич Егор Максимович

Научный руководитель:
с.н.с ЛОБД ИЯИ РАН, д.ф. - м.н
Кузнецов Михаил Юрьевич

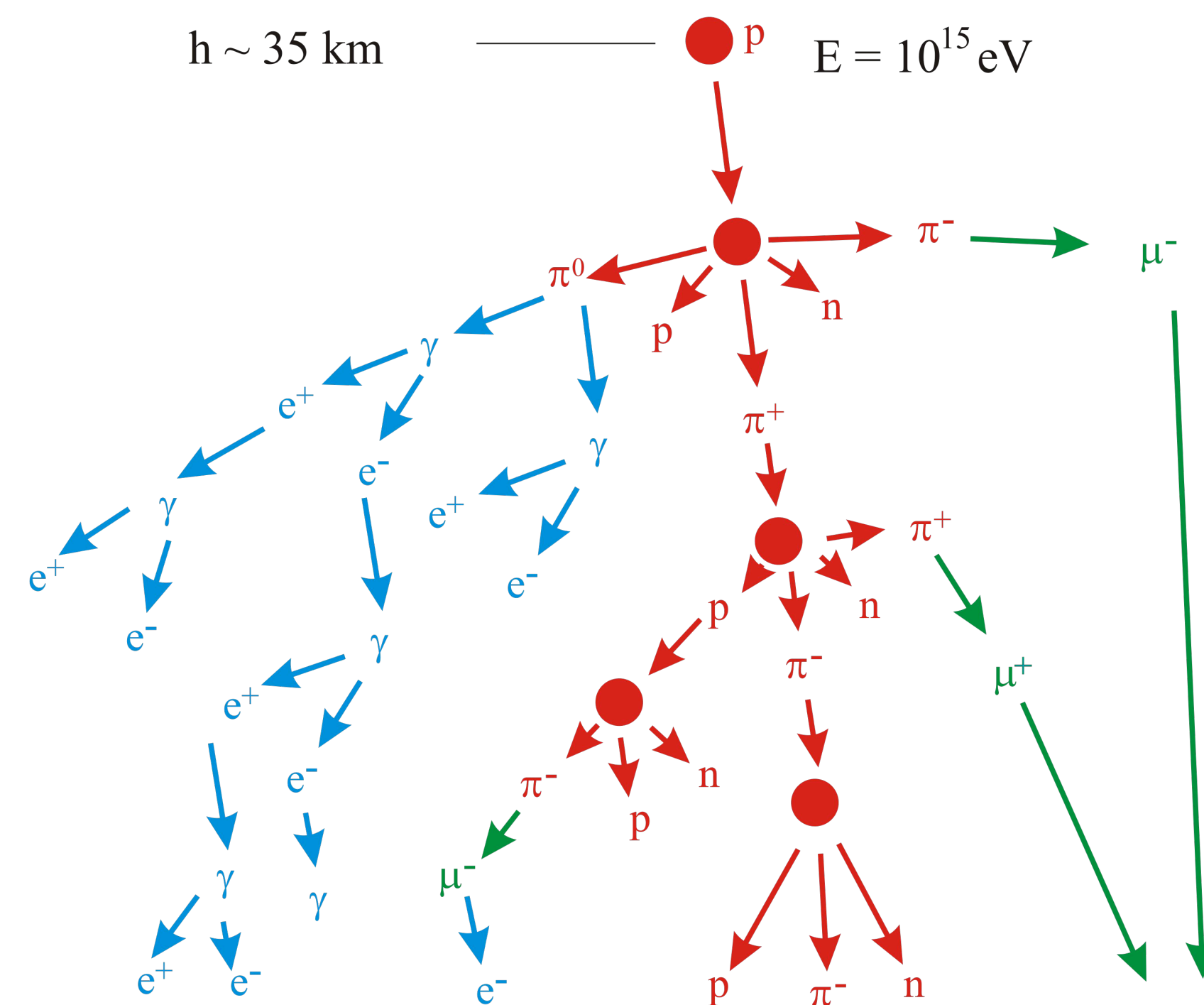
Кафедра физики частиц и космологии
27 мая 2026 г.

Введение

Космические лучи

Космические лучи - потоки заряженных частиц высоких энергий (в основном протонов и атомных ядер), прилетающие на Землю из космоса.

Широкий атмосферный ливень (ШАЛ) - лавинообразный каскад вторичных частиц, возникающий при столкновении первичной частицы с атмосферой.



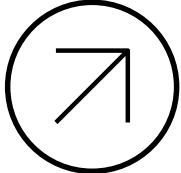
Движение космических лучей в галактике в основном определяется взаимодействием с галактическим магнитным полем. Это взаимодействие характеризуется **магнитной жесткостью R**:

$$R = \frac{pc}{Ze}$$

Цели работы

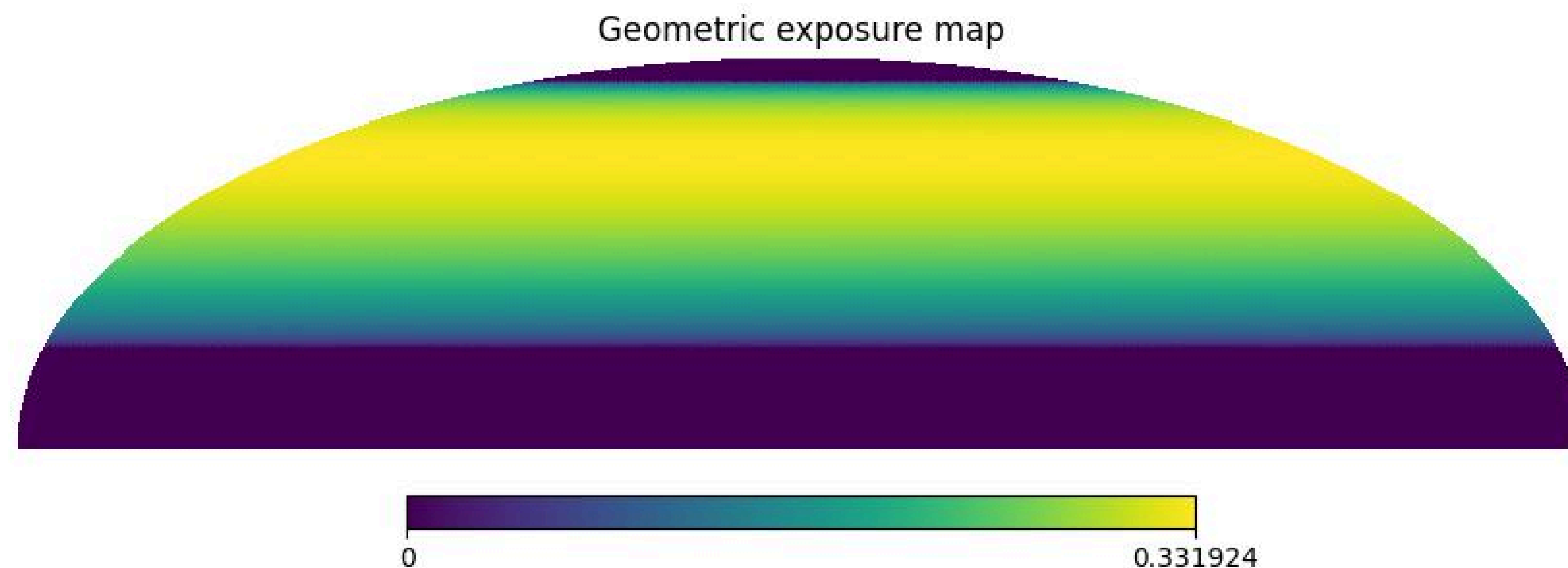
- Провести обзор и сравнительный анализ методов, используемых для анализа анизотропии, с учётом ограниченного поля зрения детектора.
- Проанализировать анизотропию в unblind наборе данных эксперимента KASCADE для всех угловых размеров анизотропии.

01

Методы анализа
анизотропии 

Экспозиция и Монте-Карло 1.1

Для анализа анизотропии в данной работе требуются изотропные наборы данных Монте-Карло для исследований средне- и мелкомасштабной анизотропии. Эти наборы данных генерируются с использованием карты относительной экспозиции, то есть функции, соответствующей чувствительности детектора для заданного направления прихода частиц.



Карта экспозиции детектора для широты KASCADE с зенитным углом $<30^\circ$

Крупномасштабная анизотропия

1.2

Метод Восток-Запад инвариантен относительно различных суточных эффектов.

Диполь в звездном времени соответствует физическому результату, в то время как диполи в солнечном и антизвездном времени служат критериями надежности результата.

$$a = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \cos(t_i + \zeta_i)$$

$$b = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \sin(t_i + \zeta_i)$$

Разложение по первой гармонике. ζ_i принимает значения 0 и π в локальном восточном и западном полушариях соответственно

$$\hat{D}_{\perp} = \frac{\pi}{2 \langle \sin \theta \rangle} \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\hat{\alpha}_d = \frac{\pi}{2} + \arctan \left(\frac{b}{a} \right)$$

Из этих коэффициентов вычисляются амплитуда диполя и его фаза.

$$\sigma = \frac{\pi}{2 \langle \sin \theta \rangle} \sqrt{\frac{2}{N}}$$

$$p(D_{\perp} > \hat{D}_{\perp}) = \exp \left(-\frac{\hat{D}_{\perp}^2}{2\sigma^2} \right)$$

Значимость может быть посчитана аналитически

Средне- и мелкомасштабная анизотропия 1.3

Оценка Ланди-Салая для кумулятивной автокорреляции

$$w(\psi) = \frac{DD(\psi) - 2DR(\psi) + RR(\psi)}{RR(\psi)}$$

где $DD(\psi)$ - количество пар событий в анализируемом наборе данных, $RR(\psi)$ - количество пар событий в выборке Монте-Карло, соответствующей изотропному распределению, а $DR(\psi)$ - количество перекрестных пар.

Псевдоспектр мощности

$$\delta I(\vec{n}) = \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_{lm}(\vec{n}) \quad \left| \quad C_l = \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^l |a_{lm}|^2 \right.$$

Спектр мощности

$$\bar{C}_l = 2\pi \int_{-1}^1 \bar{\xi}(\psi) P_l(\cos \psi) d(\cos \psi)$$

$$\tilde{\xi}(\psi) = \frac{1}{4\pi} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) \tilde{C}_l P_l(\cos \psi)$$

Скорректированный

Псевдокорреляционная функция

Pre-trial и post-trial p-value

Pre-trial p-value — это доля изотропных наборов Монте-Карло, которые показывают более сильный сигнал, чем наши реальные данные.

Глобальная значимость, или **post-trial p-value**, — это доля наборов Монте-Карло, в которых минимальное pre-trial p-value меньше или равно pre-trial p-value реальных данных.

Из-за ограниченного углового масштаба (около 60 градусов) мы анализируем **углы менее 60 градусов и мультиполи l больше 3**.

Для реальных данных различные энергетические бины и типы частиц рассматриваются как независимые.

Сравнение чувствительности автокорреляционной функции и спектра мощности

1.4

Попробуем ввести некий аналог кумулятивного спектра мощности:

$$C_i^{sum} = \sum_{j=i}^{N_{bin}} C_j^{bin}$$

Анизотропия моделируется с использованием некоторой функции $f(\vec{n})$, где параметр ϵ определяет уровень анизотропии в карте.

$$I(\vec{n}) = 1 + \epsilon \frac{f(\vec{n})}{\max(f(\vec{n}))}$$

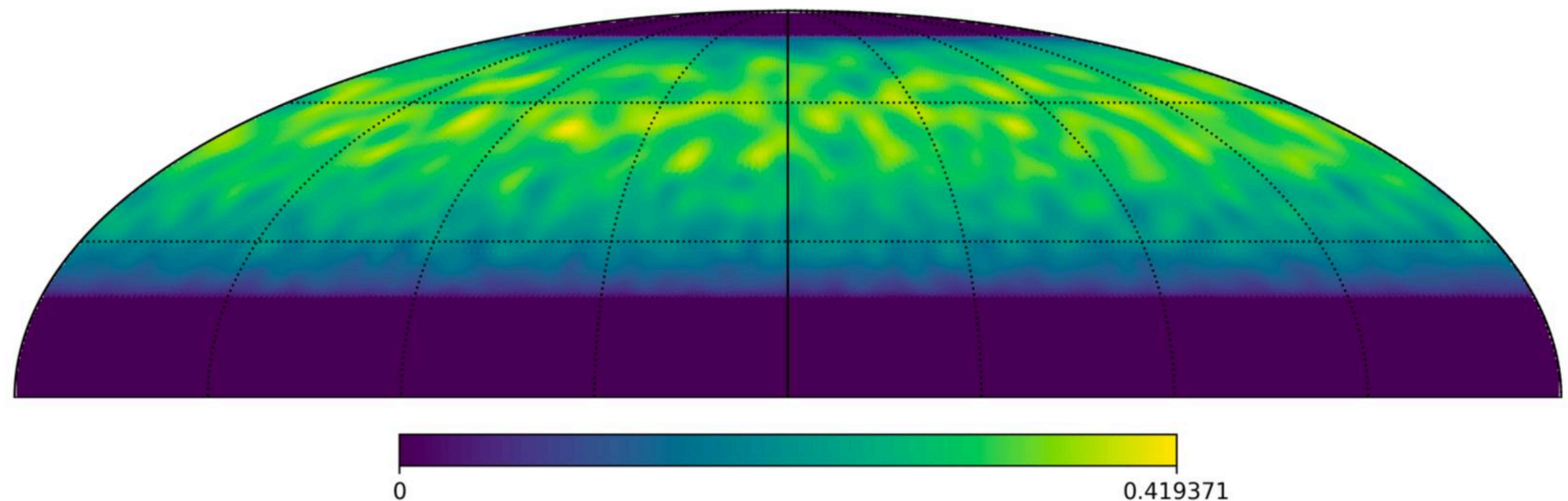
Сравнение проводится на уровне медианного post-trial p-value по 10 000 наборам данных с учетом вариации сгенерированных карт для моделей с заданным спектром мощности.

Модель гауссового спектра мощности

Эта модель определяется следующим спектром мощности:

$$C_l = \exp\left(-\frac{(l - l_0)^2}{2\sigma^2}\right)$$

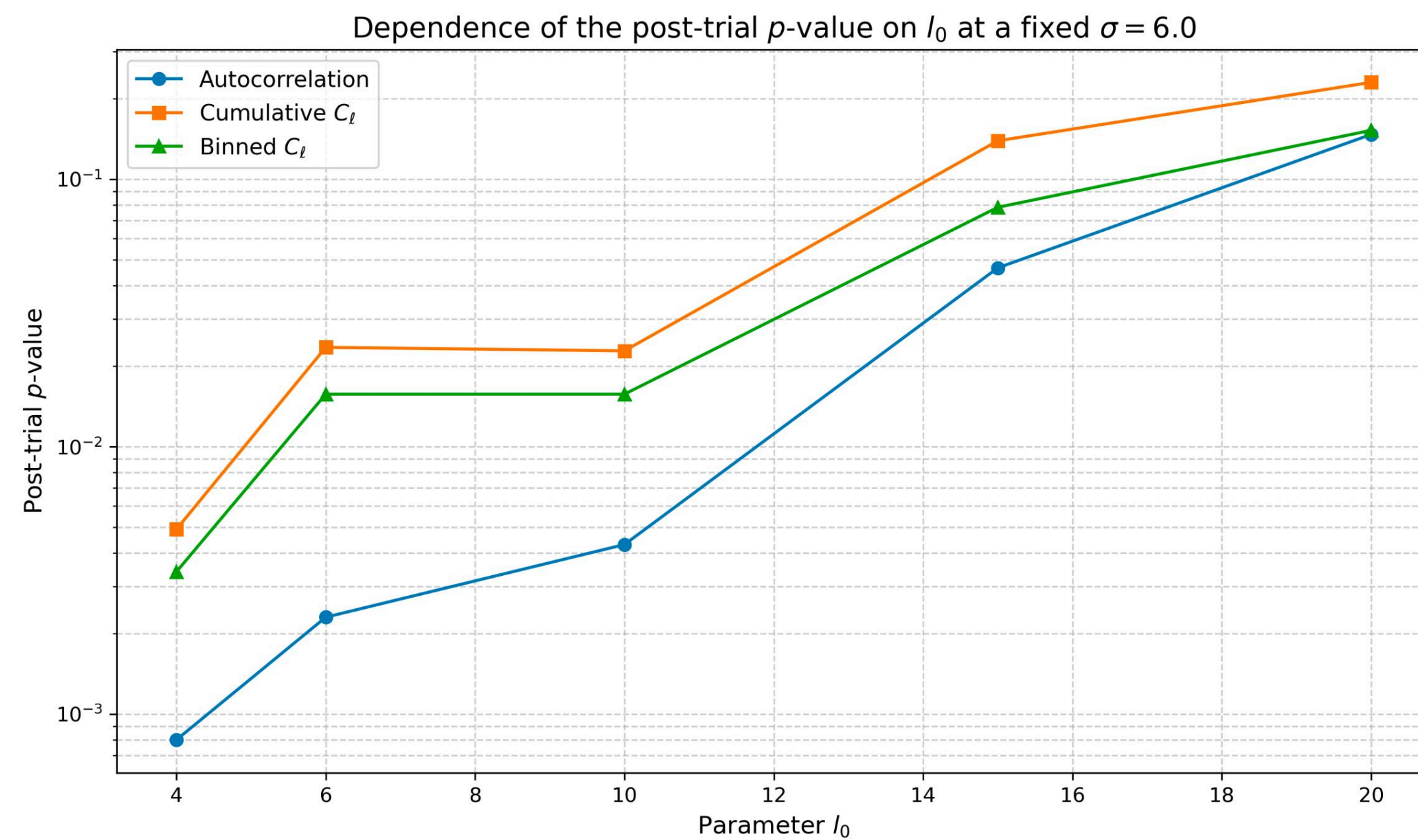
Карта анизотропии для этой модели с $(\sigma = 10)$ и $(l_0 = 30)$ с учетом экспозиции детектора



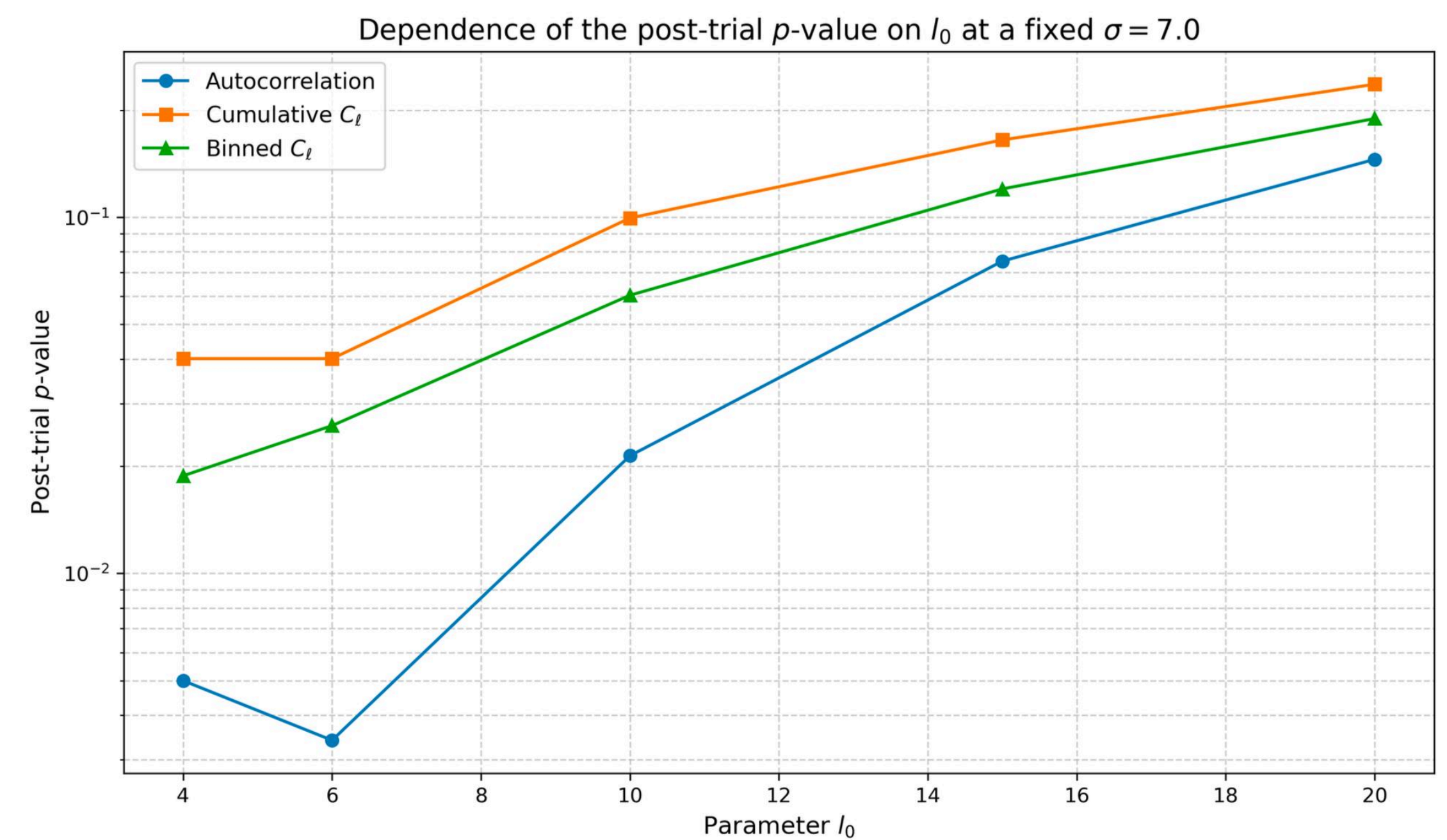
Модель гауссового спектра мощности

Сравнение автокорреляционной функции и спектра мощности для этой модели при различных значениях l_0 и фиксированном σ .

$$\epsilon = 0.3$$



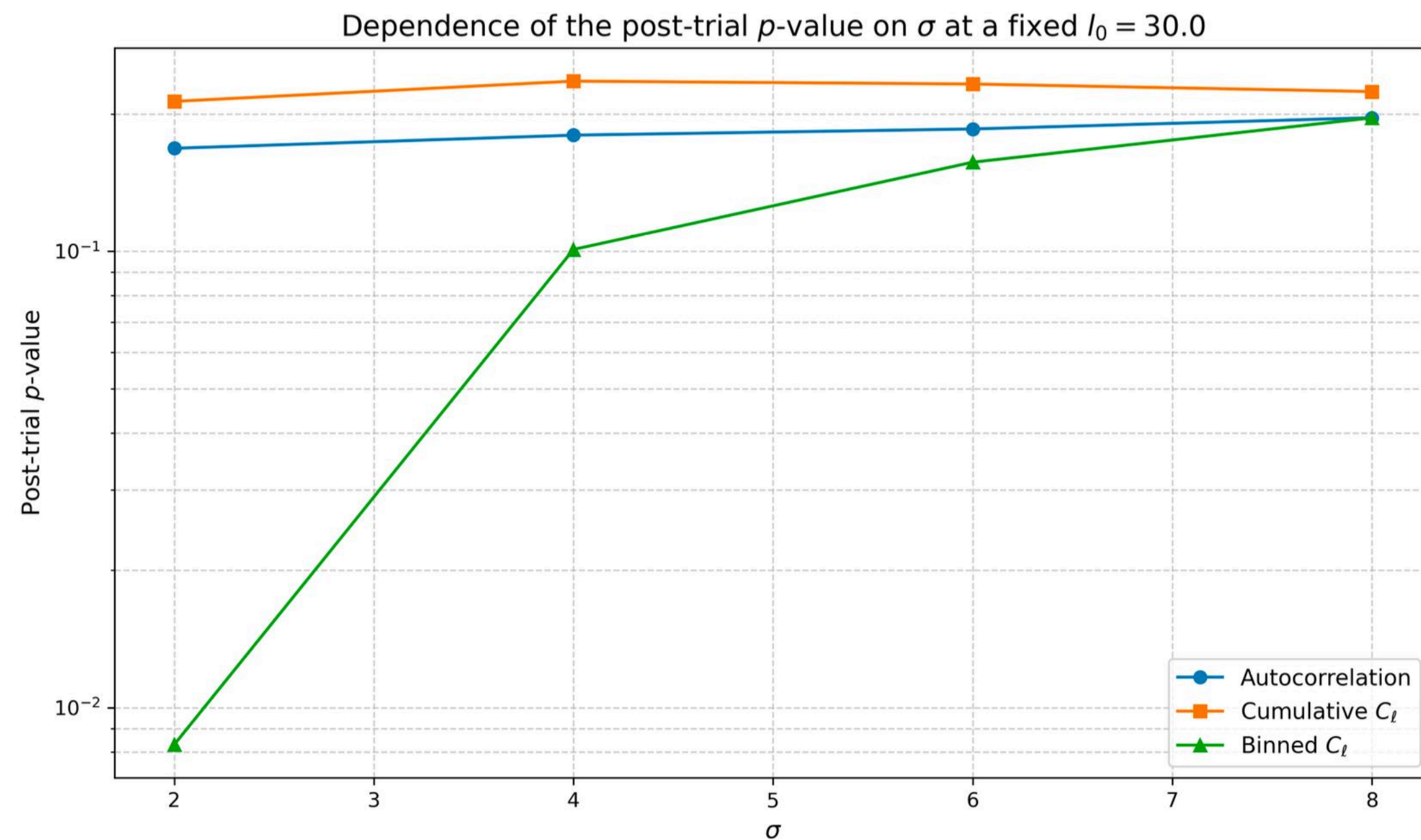
(b) $\sigma = 6$



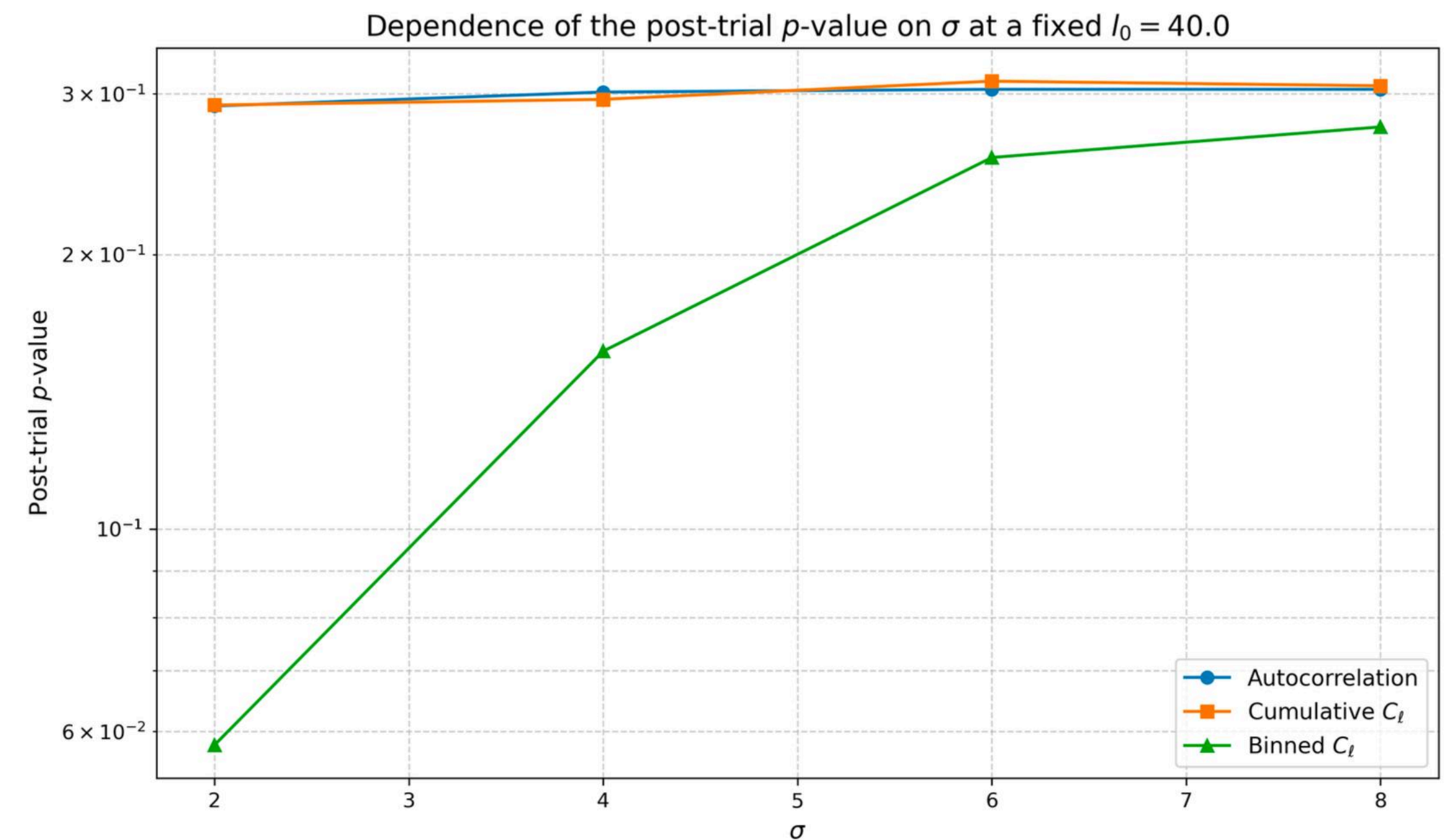
(c) $\sigma = 7$

Модель гауссового спектра мощности

Сравнение автокорреляционной функции и спектра мощности для этой модели при различных значениях (σ) и фиксированном (l_0). $\epsilon = 0.35$



(a) $l_0 = 30$



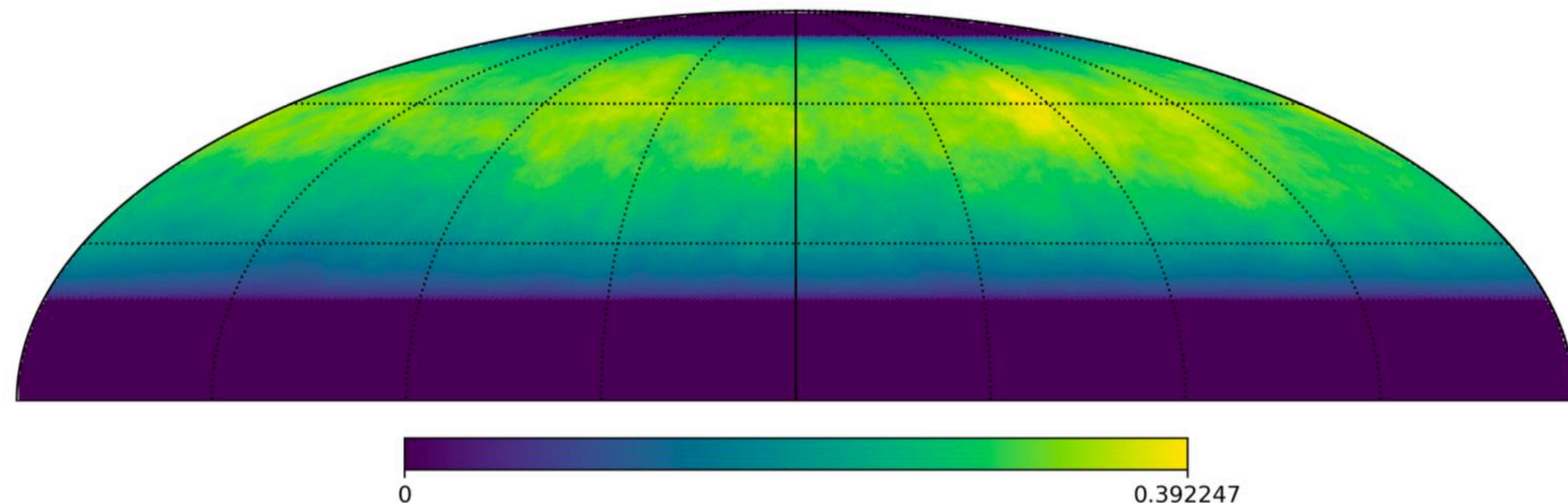
(b) $l_0 = 50$

Модель турбулентной диффузии

Эта модель определяется следующим спектром мощности:

$$C_l = \frac{1}{(2l + 1)(l + 1)(l + 2)}$$

Анизотропная карта для этой модели с учетом экспозиции детектора:



Сравнение медиан post-trial p-value для различных методов:
 $\epsilon = 0.3$

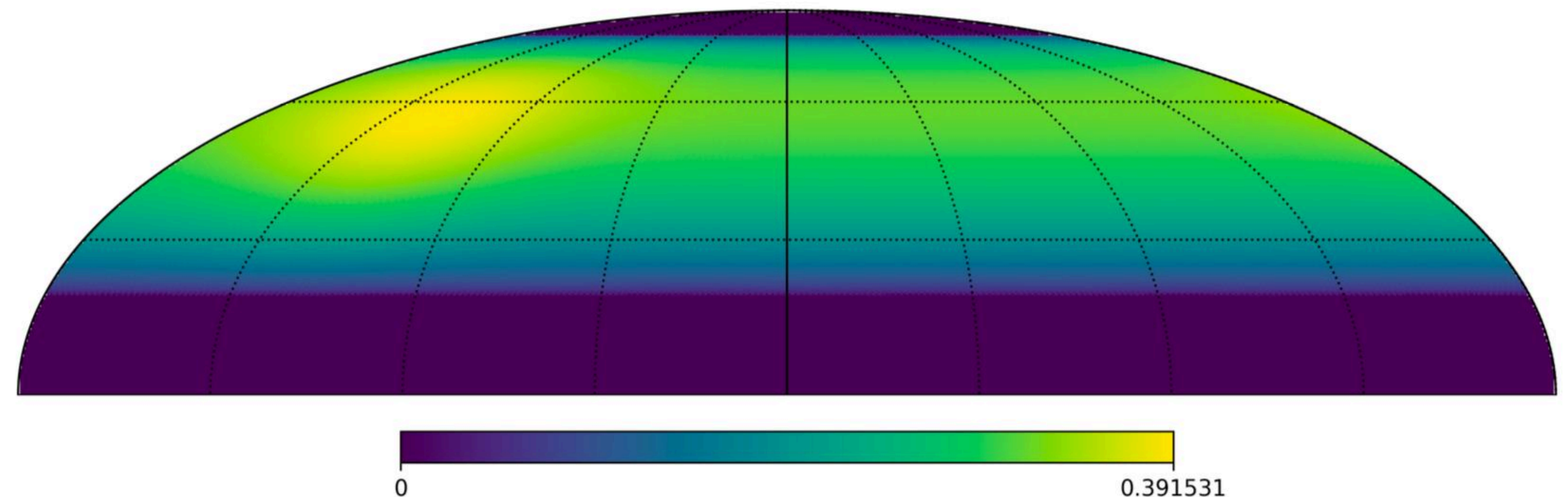
Method	Median post-trial p -value
Autocorrelation	0.0011
Binned power spectrum	0.0061
Cumulative power spectrum	0.1162

Модель гауссового источника

Эта модель определяется следующим образом:

$$f(\vec{n}) = \exp\left(-\frac{\psi^2(\vec{n}, \vec{n}_0)}{2\sigma^2}\right)$$

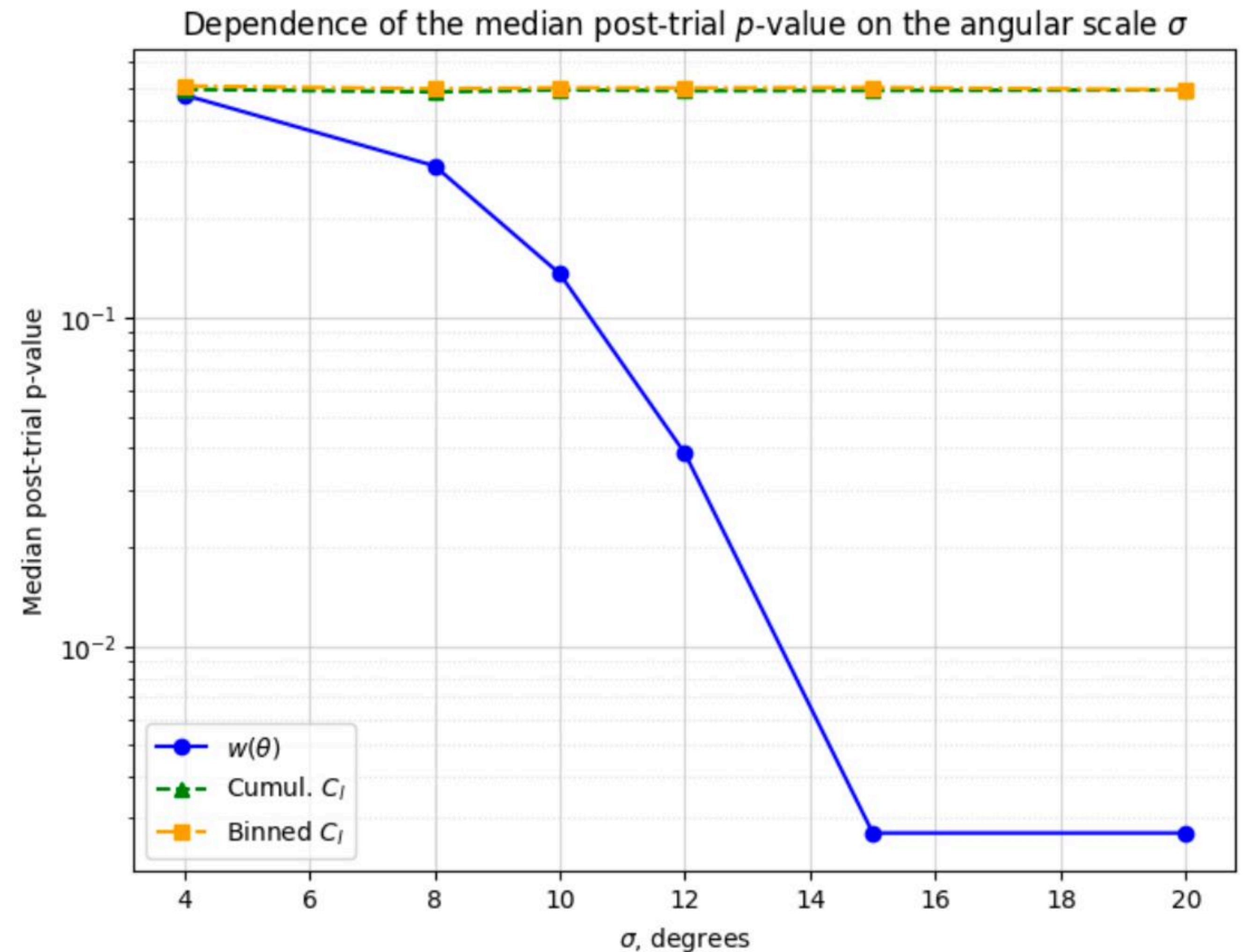
Анизотропная карта для этой модели с учетом экспозиции детектора:



Модель гауссового источника

Сравнение автокорреляционной функции и спектра мощности для этой модели при различных значениях угловых масштабов (σ)

$$\epsilon = 0.25$$



02

**Анализ данных
эксперимента
KASCADE [⌚]**

Данные эксперимента

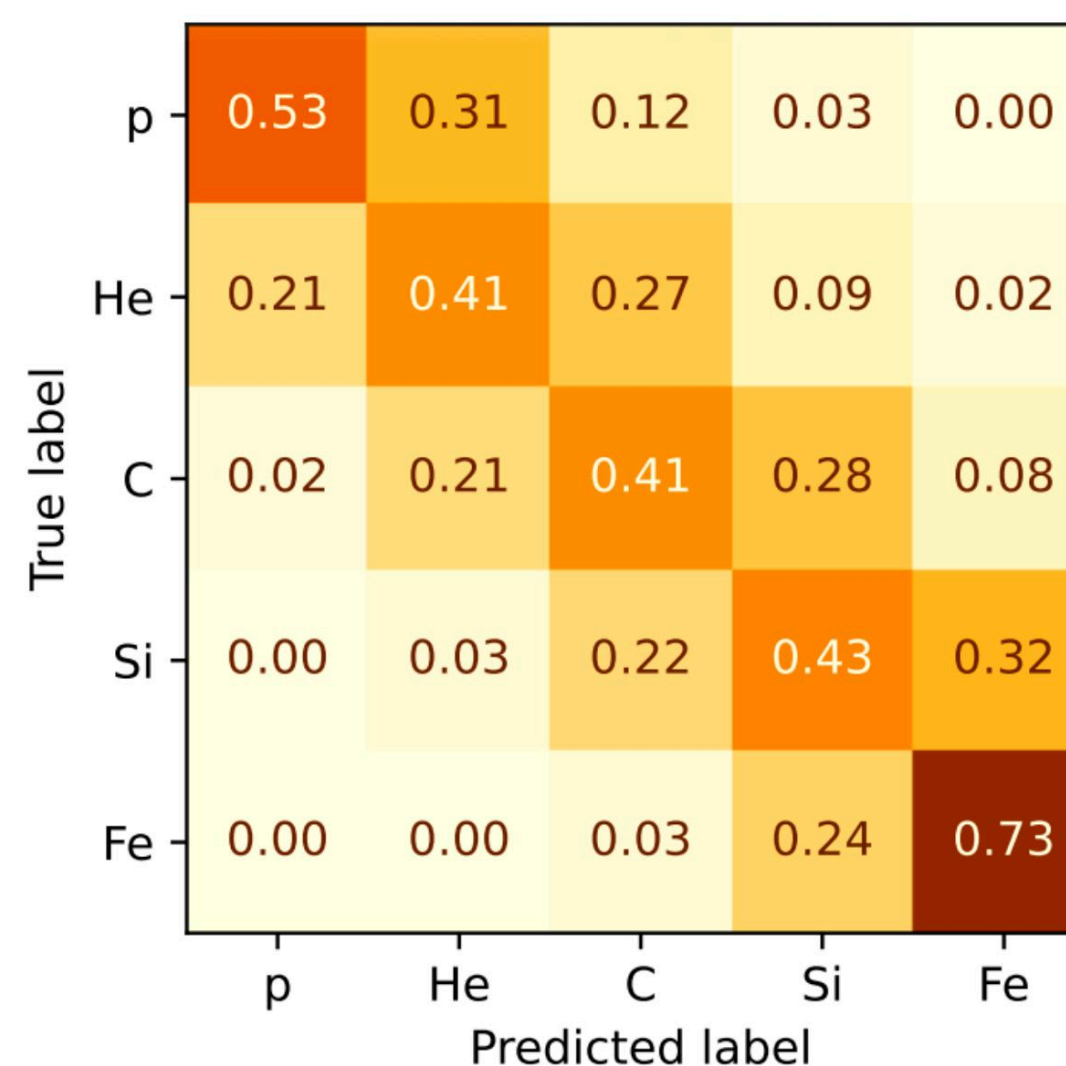
2.1

Описанные выше подходы были применены к архивным данным эксперимента KASCADE. KASCADE функционировал с 1996 по 2013 год в кампусе KIT в Карлсруэ, Германия (49° с. ш., 8.4° в. д., 110 м над уровнем моря).

В ходе эксперимента измерялись широкие атмосферные ливни в диапазоне первичных энергий примерно от 500 ТэВ до 100 ПэВ.

В данной работе анализируется unblind набор данных, классифицированный по типам частиц, который составляет 10% от полного набора данных.

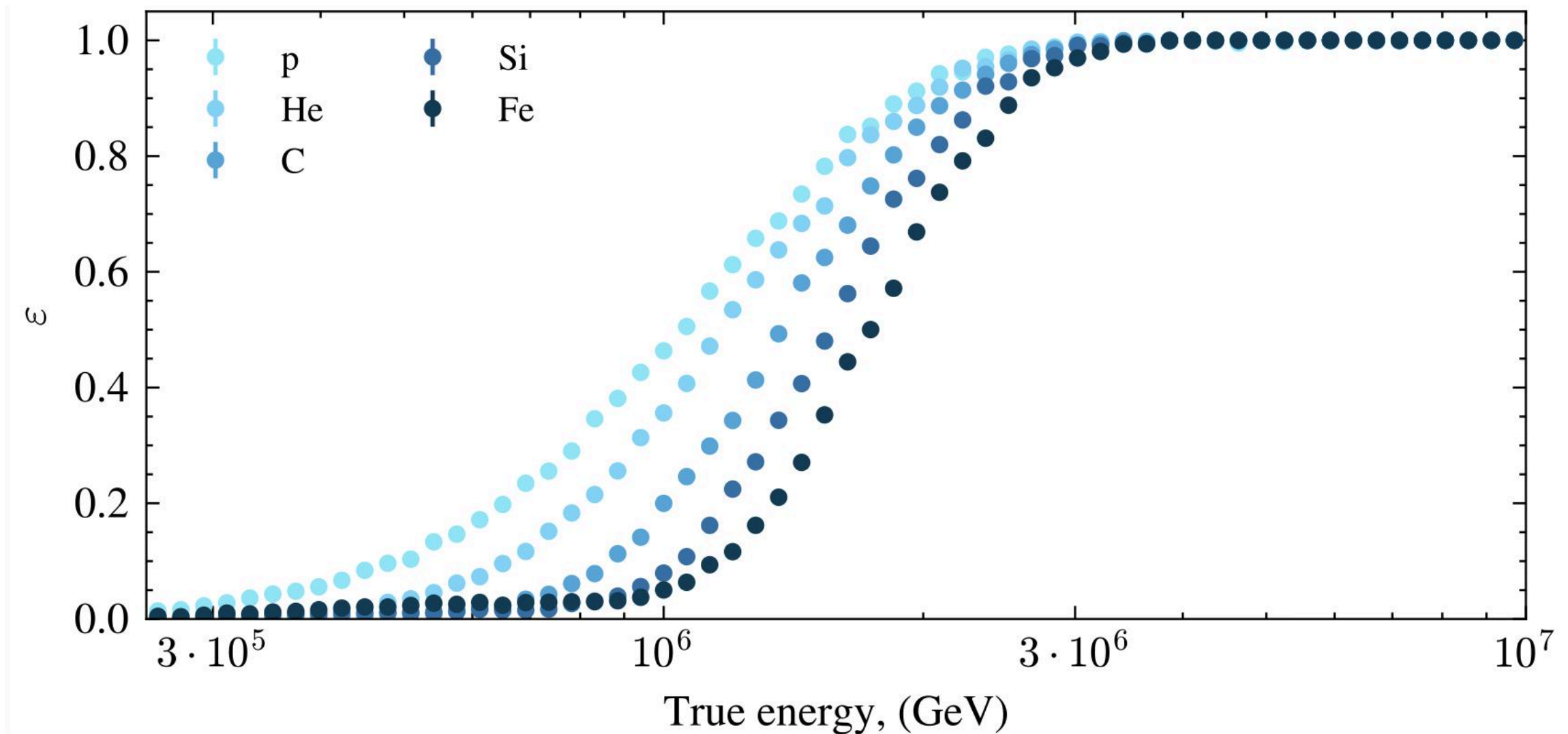
Матрица ошибок сверточной нейронной сети:



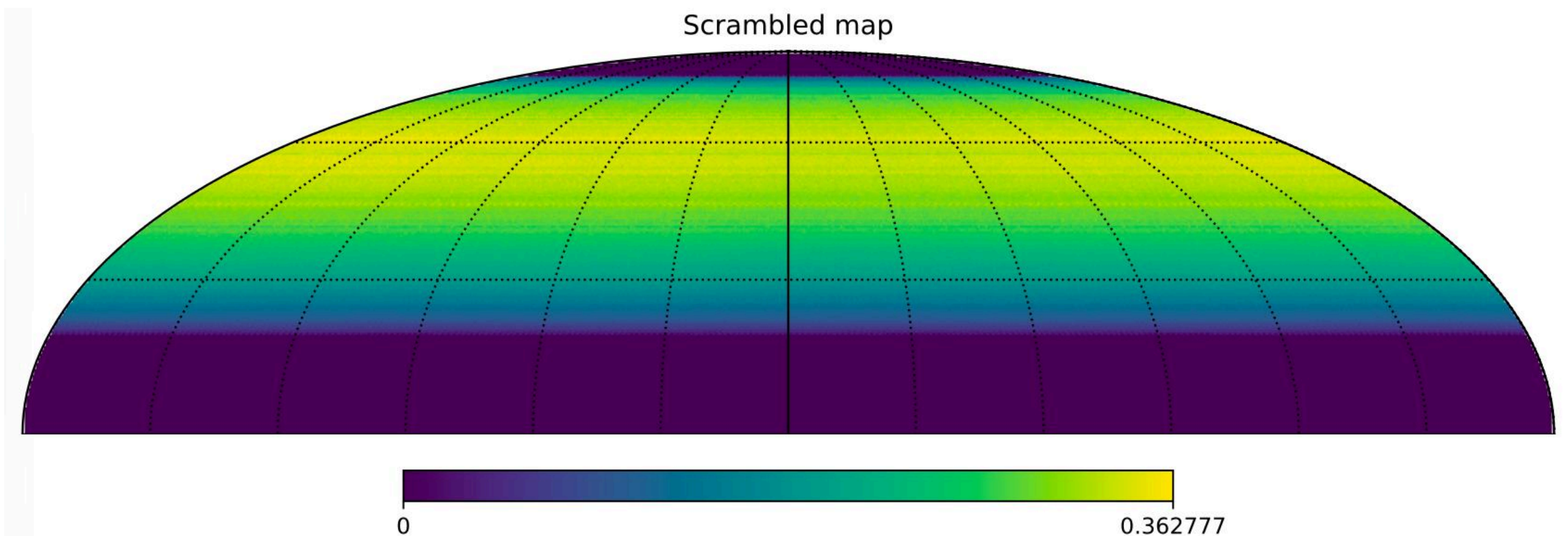
M. Yu. Kuznetsov, N. A. Petrov, I. A. Plokhikh, and V. V. Sotnikov. Methods of machine learning for the analysis of cosmic rays mass composition with the KASCADE experiment data. JINST, 19(01):P01025, 2024.

Экспозиция детектора KASCADE не соответствует геометрической экспозиции, что следует, например, из анализа зависимости эффективности детектора от типа и энергии первичной частицы.

В данном случае необходимо использовать методы восстановления экспозиции. В этой работе применяется метод перемешивания времени. Пример карты для протонов при $\lg(E/\text{eV}) > 15.15$:

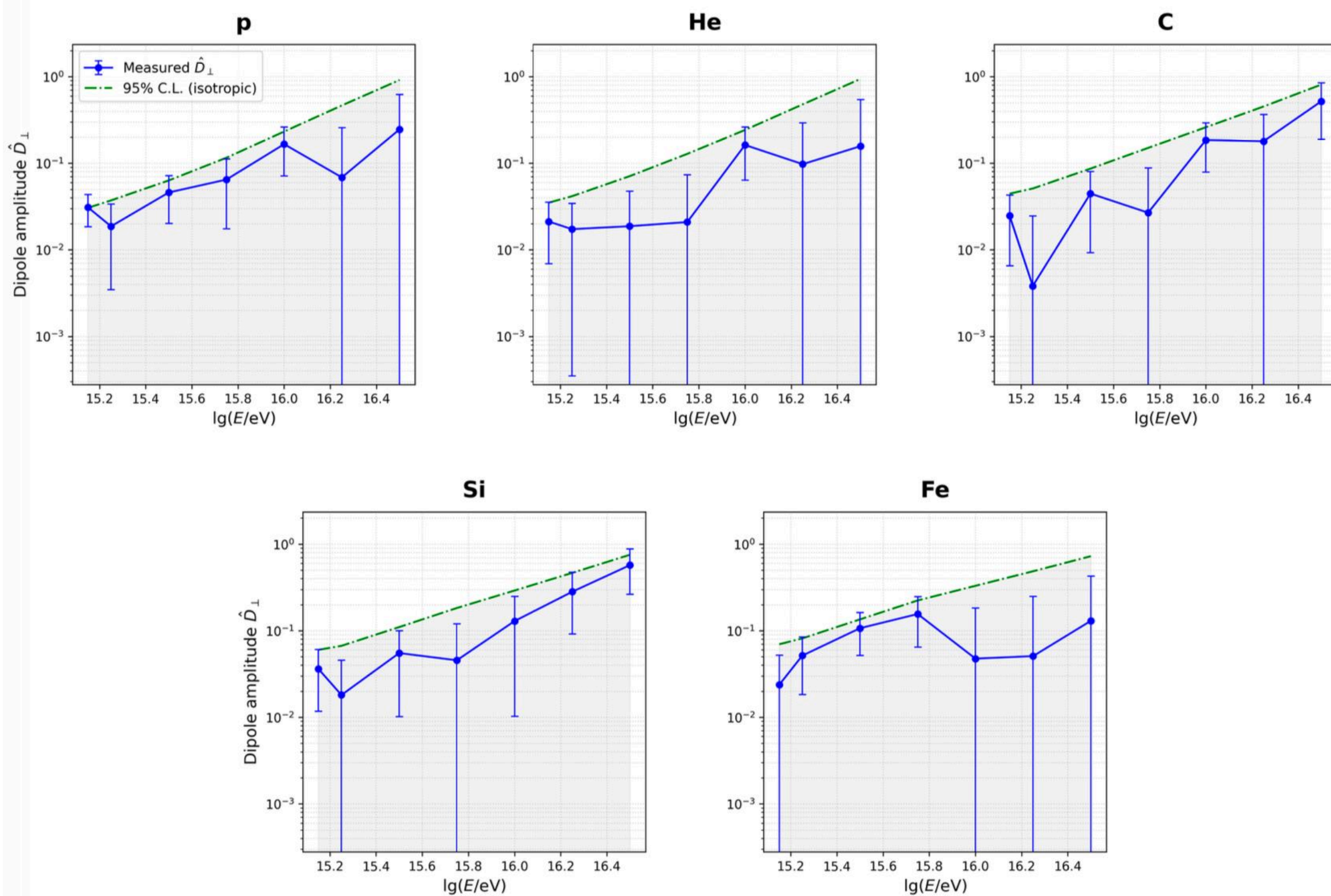


Зависимость эффективности детектора от энергии для различных типов частиц.



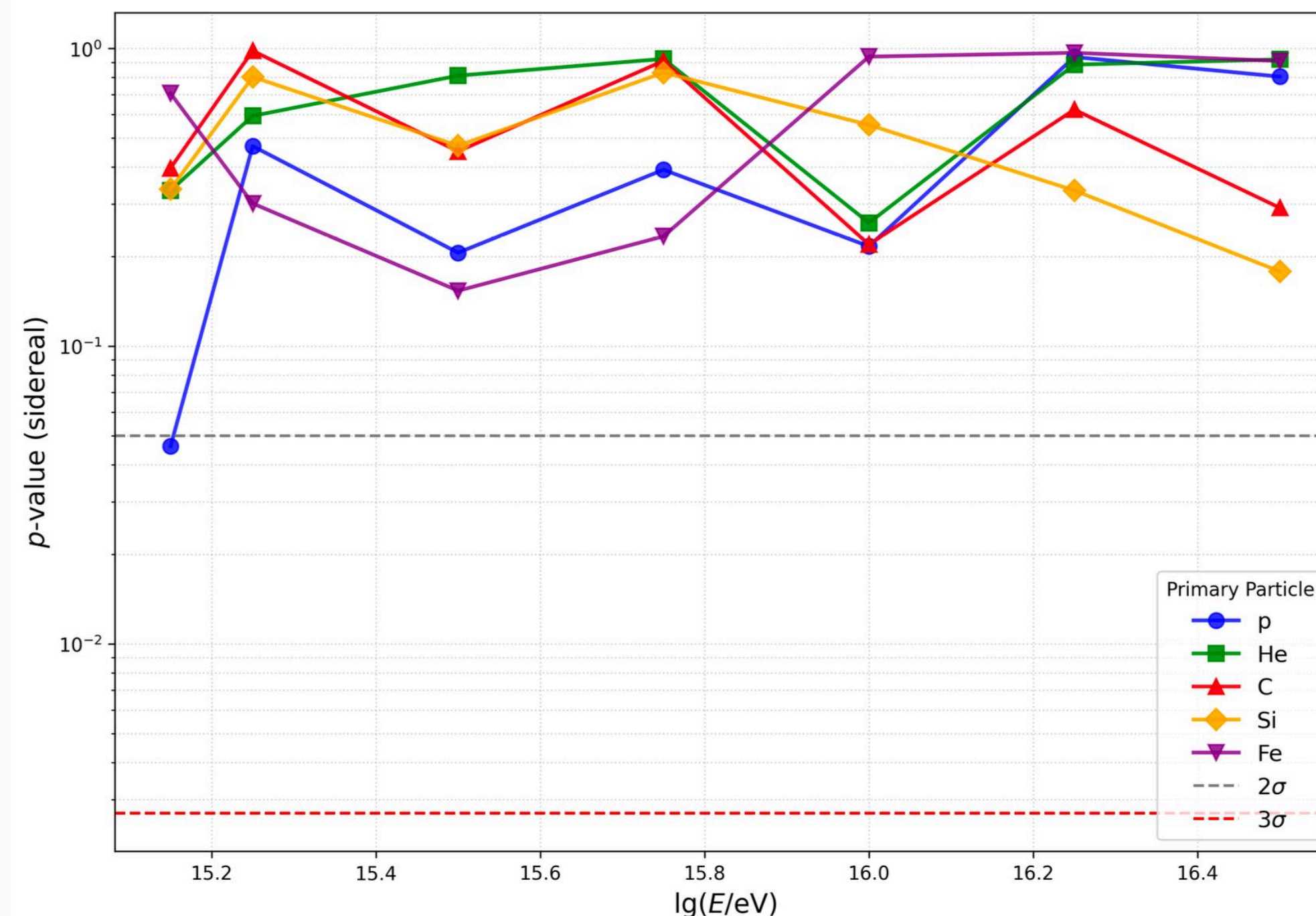
Крупномасштабная анизотропия

2.2



Значения поперечной компоненты диполя для различных типов частиц и интервалов энергий

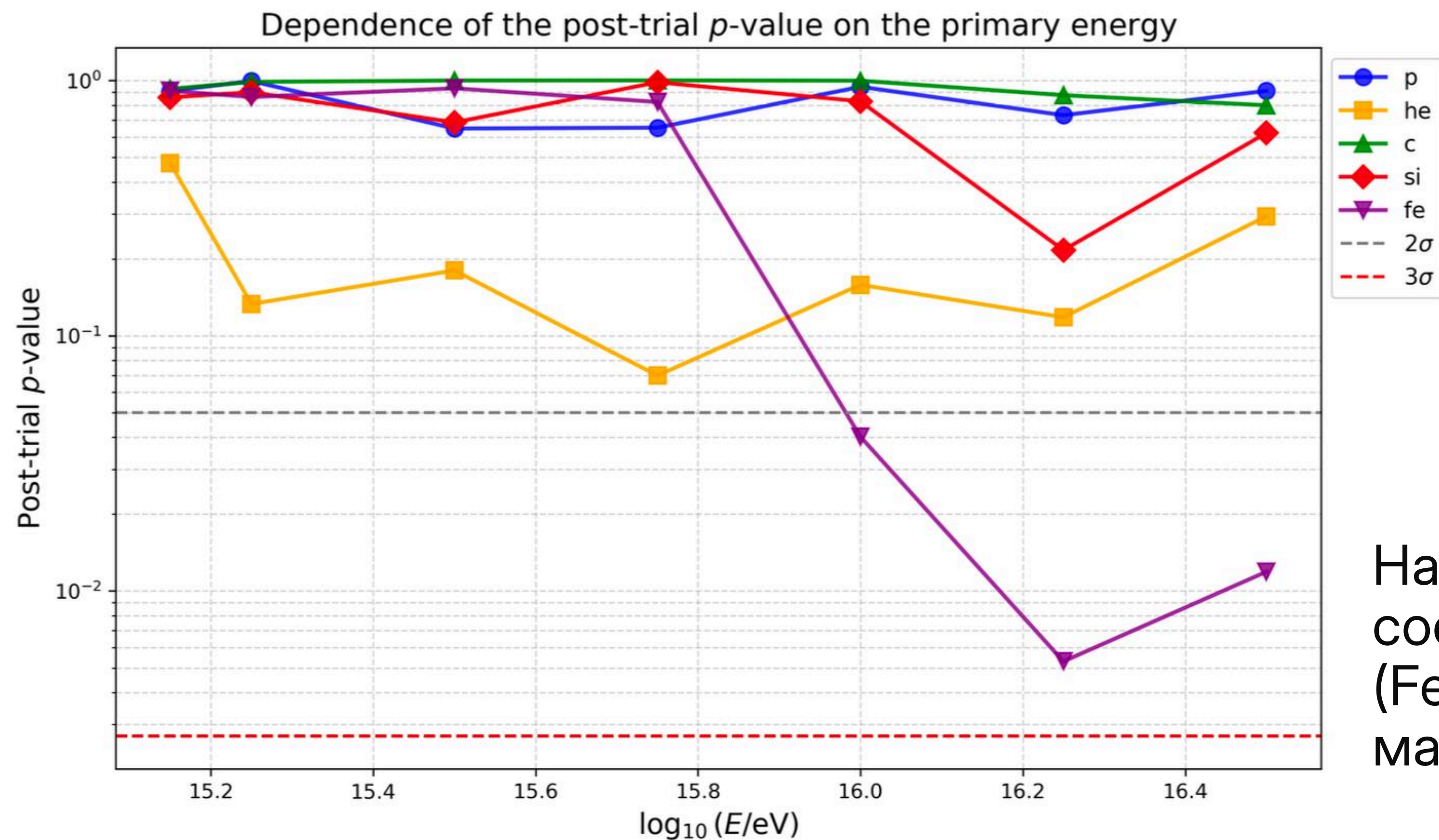
Самое низкое значение $p_{sid} = 0.046$ для протонов при $\lg(E/eV) > 15.15$



Значения p-value, полученные методом Восток-Запад для различных типов частиц и интервалов энергий

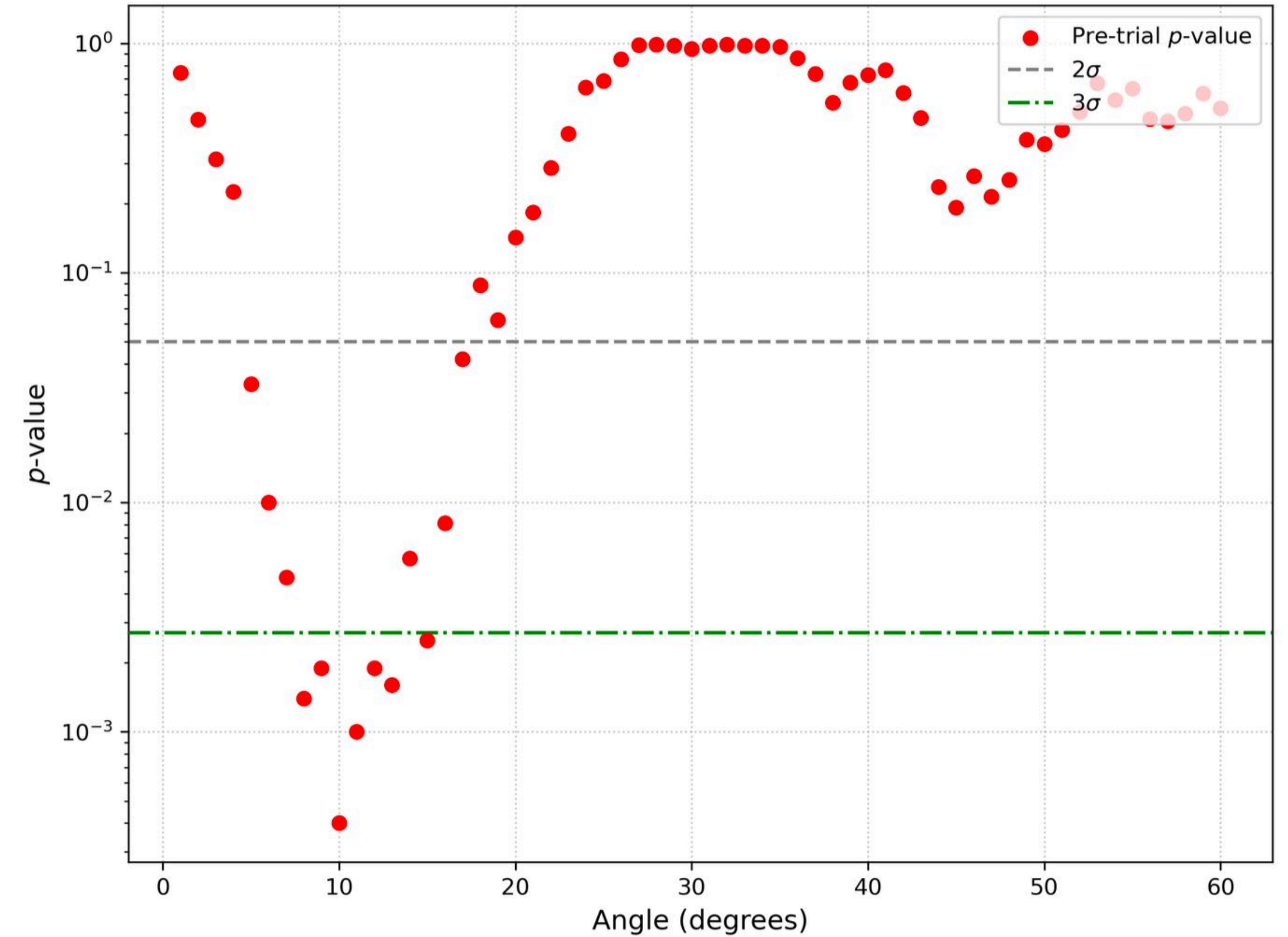
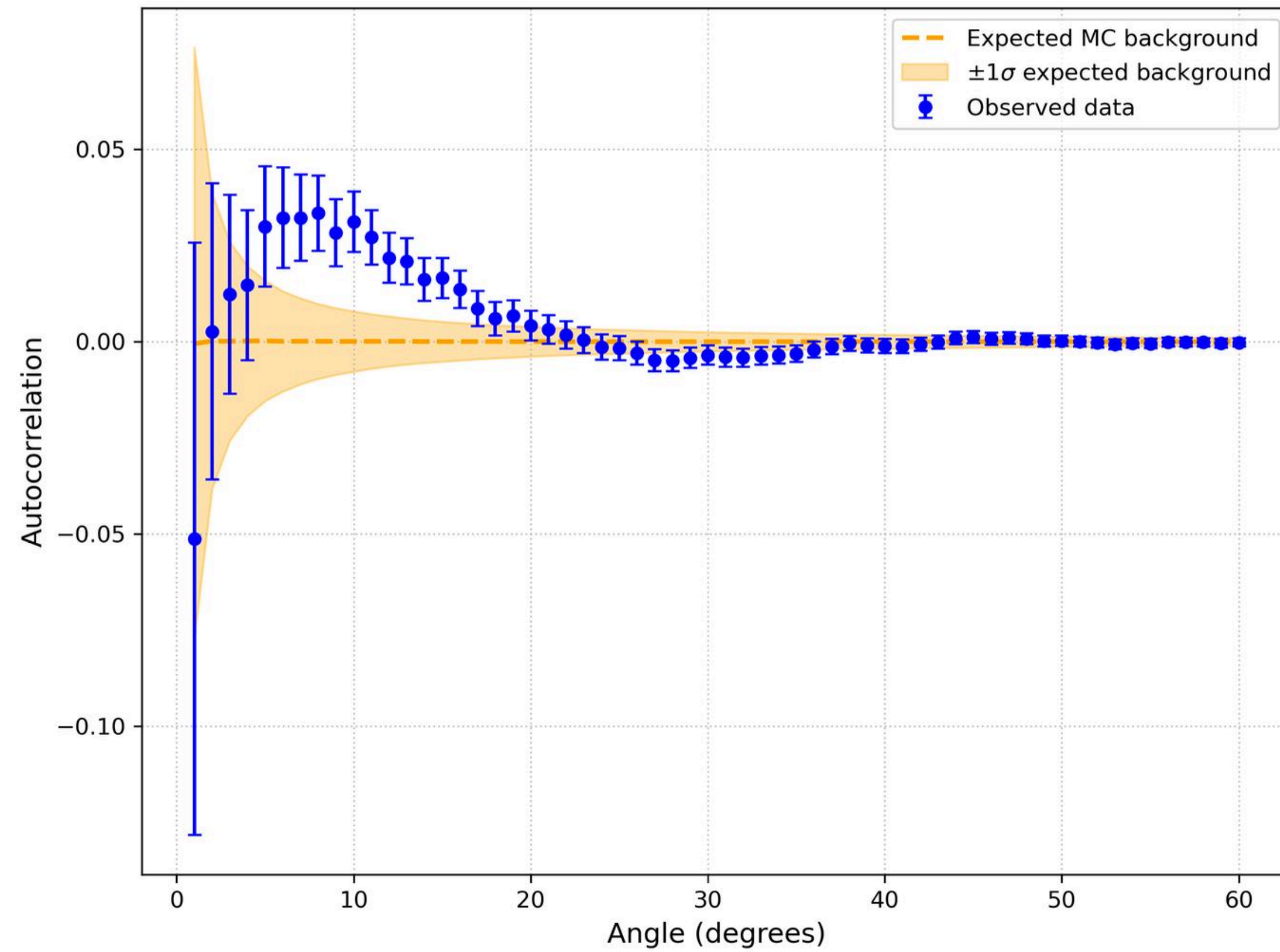
Автокорреляционный анализ

2.3



Наименьшее p -value соответствует 2.55σ для железа (Fe) при $\lg(E/eV) > 16.25$ на угловом масштабе около 10 градусов.

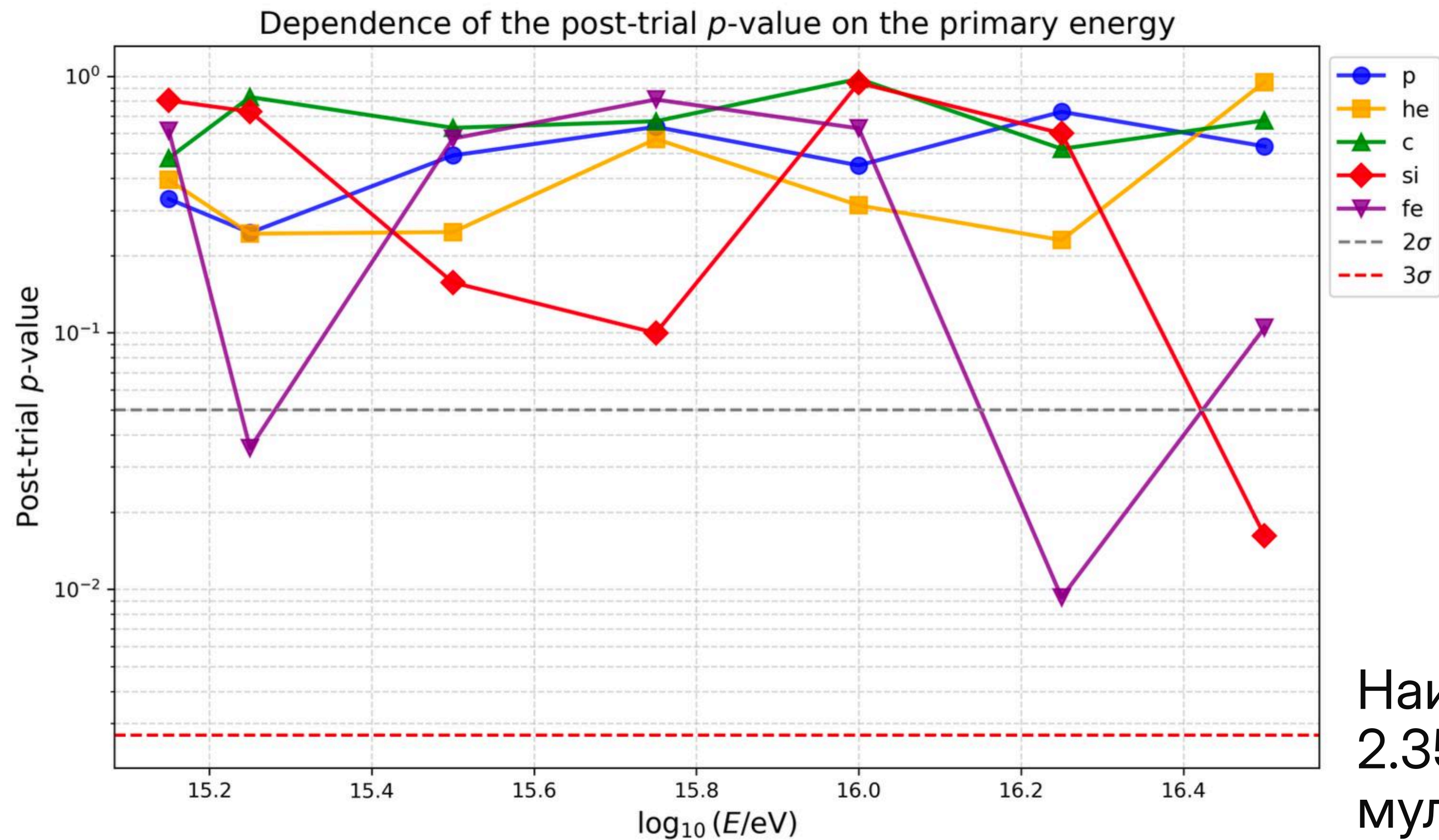
Значения p -value, полученные методом автокорреляции для различных типов частиц и интервалов энергий



Автокорреляция и соответствующее
pre-trial p-value для железа (Fe)
при $\lg(E/eV) > 16.25$

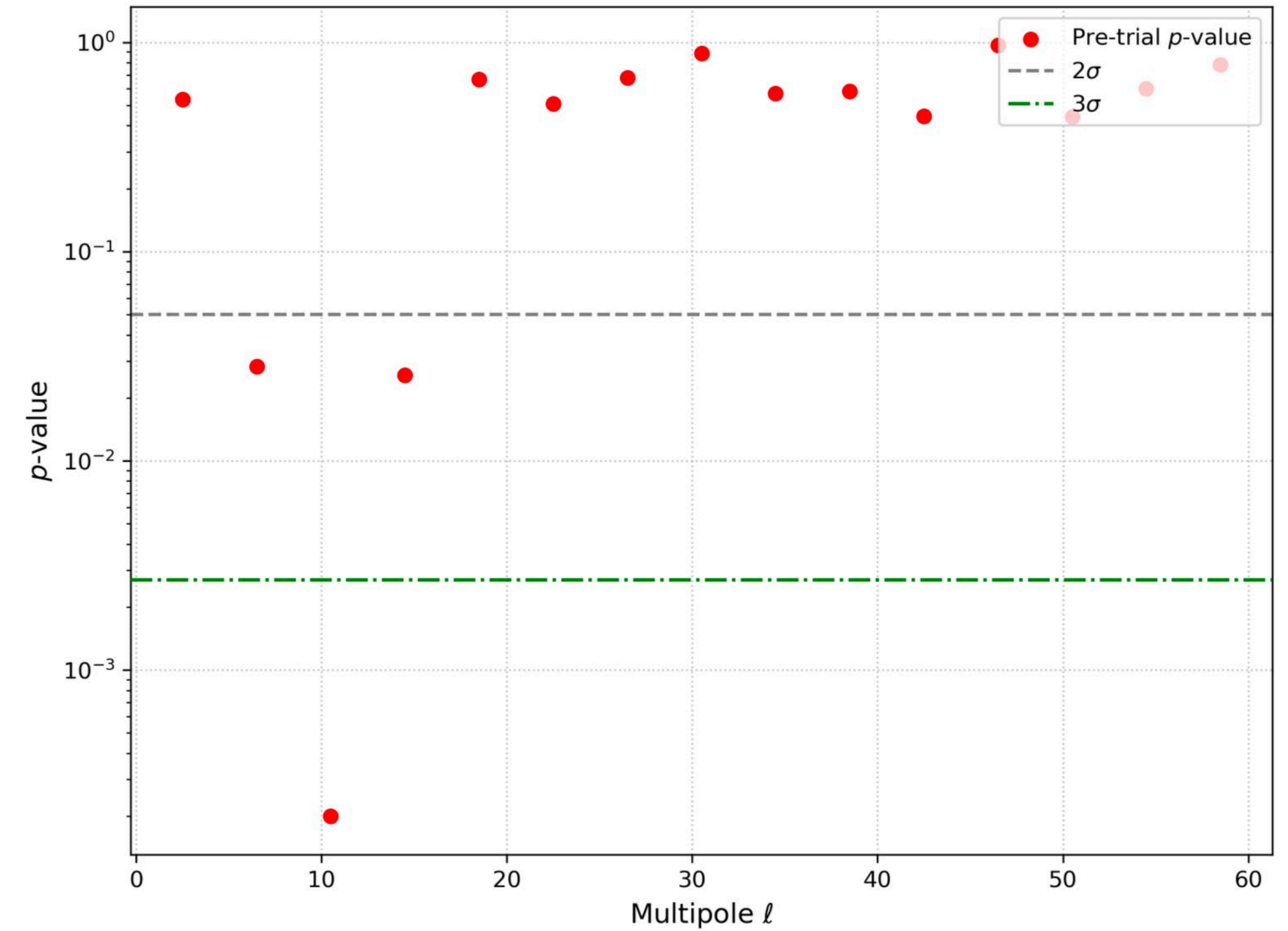
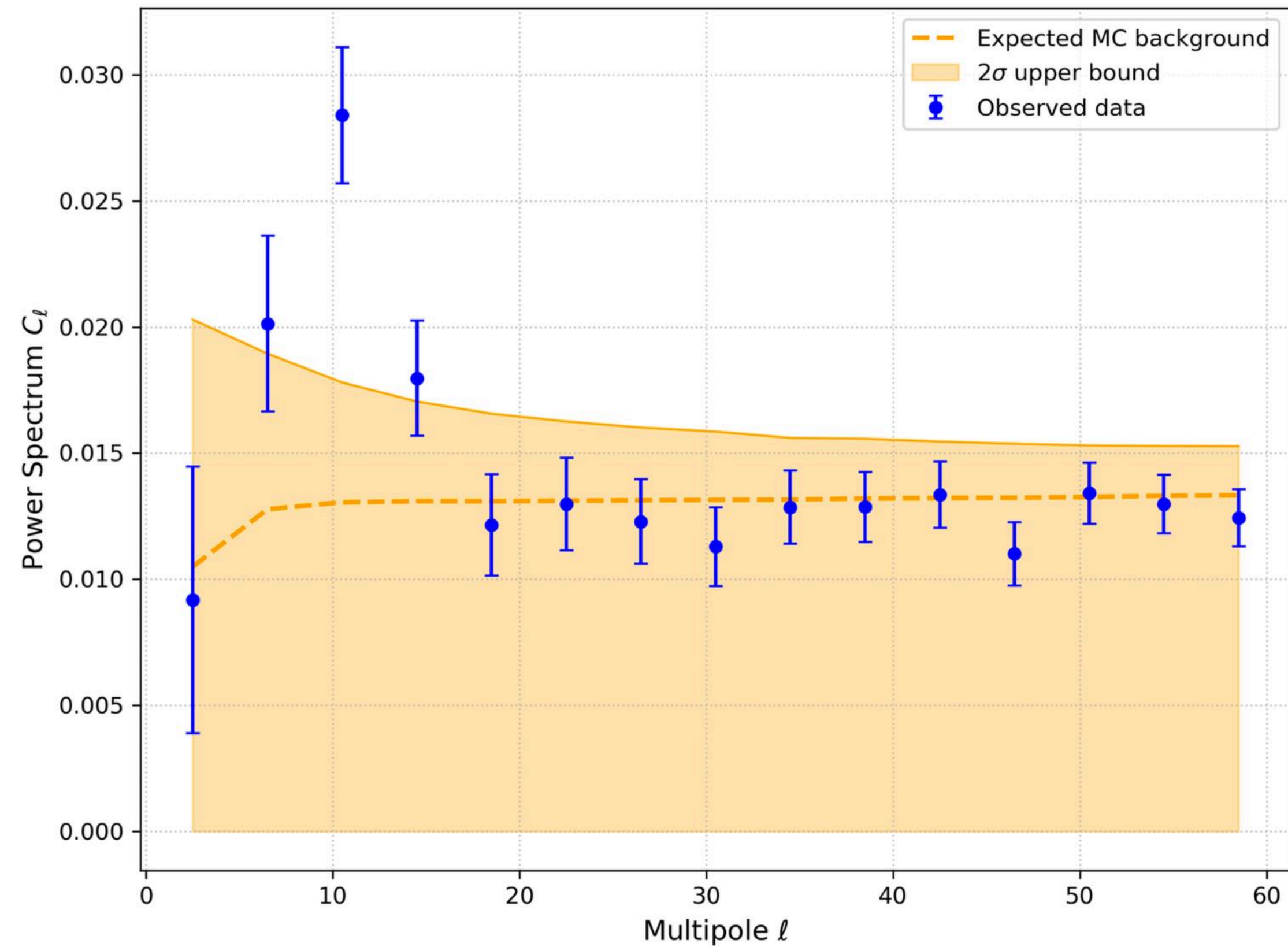
Мультипольный анализ

2.4



Наименьшее p -value соответствует 2.35σ для железа (Fe) при мультиполе $l = 12$.

Значения p -value, полученные методом спектра мощности для различных типов частиц и интервалов энергий



Спектр мощности и соответствующее pre-trial p -value для железа (Fe) при $\lg(E/eV) > 16.25$

Выводы

Методы

1. Метод автокорреляции эффективнее углового спектра мощности.

Он обладает лучшей статистической чувствительностью к диффузной анизотропии и способен фиксировать отдельные мультиполи.

2. Кумулятивная метрика неэффективна.

Попытка повысить чувствительность спектра мощности с её помощью провалилась из-за сильного накопления статистического шума.

Анализ данных

1. **Подтверждена изотропия** для большинства типов частиц на всех угловых масштабах.

2. **Аномалия железа (Fe):** Обнаружена анизотропия на масштабах $\sim 10^\circ$. Это указывает на регулярную структуру (а не на турбулентную диффузию или одиночный источник).

3. Отсутствие сигнала у других частиц при магнитной жесткости $R \approx 0.68 \text{ PeV}$:

a. Протоны и гелий: нехватка данных для анализа на этих масштабах.

b. Углерод и кремний: сигнал может быть скрыт из-за погрешностей классификации (перемешивание частиц).

4. Для точной интерпретации необходим анализ всех 100% данных KASCADE.

Спасибо за внимание