

Расширение диапазона измерений оптических станций установки TAIGA-HiSCORE для исследования космических лучей при энергиях выше 10^{17} эВ

Е. Р. Оганезян^{1*} Е. Е. Коростелева^{2†}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики космоса
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 24.04.2026; подписана в печать 27.04.2026)

В работе рассмотрен метод расширения динамического диапазона измерений оптических станций установки TAIGA-HiSCORE по регистрации вспышек черенковского света, вызванных широкими атмосферными ливнями (ШАЛами) от космических частиц. Целью данного исследования является улучшение точности реконструкции спектра космических частиц при энергиях выше 10^{17} эВ за счет повышения линейности сигнала от фотоумножителей. Подход основан на использовании ослабления светового потока с помощью бленд, установленных на одном из фотоумножителей станции. Представлены первые результаты обработки полученных данных.

PACS: 95.55.Vj, 96.50.S

УДК: 539.1.03

Ключевые слова: TAIGA-HiSCORE, черенковское излучение, динамический диапазон.

ВВЕДЕНИЕ

С момента своего открытия космические лучи (КЛ) стали причиной многочисленных экспериментов, направленных на то, чтобы ответить на вопросы об их происхождении, составе и спектральном распределении космических лучей. Космические лучи, происходящие из разных астрофизических источников, обладают энергией от 10^9 до 10^{20} эВ. Их энергетический спектр имеет четкие особенности, в том числе «колено» на уровне приблизительно 3 ПэВ и «лодыжка» при 3 ЭэВ [1], которые указывают на изменения либо в источниках происхождения КЛ, либо в механизмах их распространения. Понимание спектра и химического состава космических лучей имеет решающее значение для выяснения их происхождения и их взаимодействия с магнитными полями.

Наземные эксперименты позволяют измерять потоки вторичных частиц в атмосфере — ШАЛы, вызванные космическими лучами или гамма-излучением, с помощью детекторов частиц или детекторов излучения. Неотъемлемым инструментом в изучении широких атмосферных ливней являются наземные установки, регистрирующие вспышки черенковского света.

Установка TAIGA-HiSCORE (Hundred**i* Square-km Cosmic ORigin Explorer) предназначена для детектирования черенковского излучения ШАЛ от космических лучей в диапазоне энергий 10^{17} – 10^{18} эВ. Установка расположена вблизи Байкала, в Тункинской долине, Бурятия, и является ключевым элементом в составе комплексной обсерватории «TAIGA» [2]. Энергетический спектр, полученный по данным работы установки

за несколько лет представлен на рис. 1 [3]. Данные установки имеют ключевое ограничение при регистрации событий для энергии 10^{17} – 10^{18} эВ — насыщение сигналов фотоумножителей. Это связано с тем, что измерительная аппаратура имеет конечный динамический диапазон. Данная работа — попытки удлинения динамического диапазона измерений и улучшения точности восстановления спектра космических частиц при энергиях выше 10^{17} .

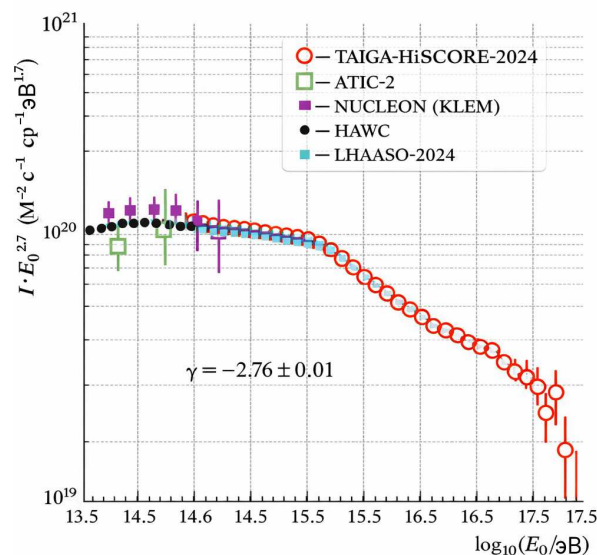


Рис. 1. Дифференциальный энергетический спектр

* oganezian.er22@physics.msu.ru

† elkrs@yandex.ru

1. ПРИНЦИП РАБОТЫ ОПТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ И ПРОБЛЕМА НАСЫЩЕНИЯ

TAIGA-HiSCORE — это массив из 120 станций — детекторов черенковского света с широким полем зрения. Каждая станция состоит из четырех фотоумножителей (ФЭУ) Hamamatsu R5912 [4] с диаметром фотокатода 20 см и коэффициентом усиления 10^4 . Каждый ФЭУ оснащен светособирающим конусом Винстона, который имеет диаметр входного окна 40 см и формирует поле зрения $\pm 30^\circ$ [5]. Для расширения динамического диапазона сигнал с ФЭУ снимается с двух точек: с анода для регистрации слабых сигналов и с предпоследнего динода для регистрации сильных. Причем динодный сигнал обладает меньшим коэффициентом усиления.

Несмотря на использование динодного сигнала, при регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ) от частиц с энергией выше 10^{17} эВ наблюдается насыщение регистрирующей электроники, особенно вблизи оси ливня [3, 6]. На рис. 2 показана функция пространственного распределения (ФПР) для одного из зарегистрированных ливней. ФПР — это зависимость плотности черенковского света от расстояния до оси ливня. Плотность черенковского света в данном случае рассчитывается (пропорциональна) как интеграл импульса анодного или динодного сигнала ФЭУ с поправками на коэффициент усиления канала. На рисунке видно, что вблизи оси ливня как анодный сигнал, так и динодный достигают предела насыщения фотоумножителей при регистрации высоких энергий [1].

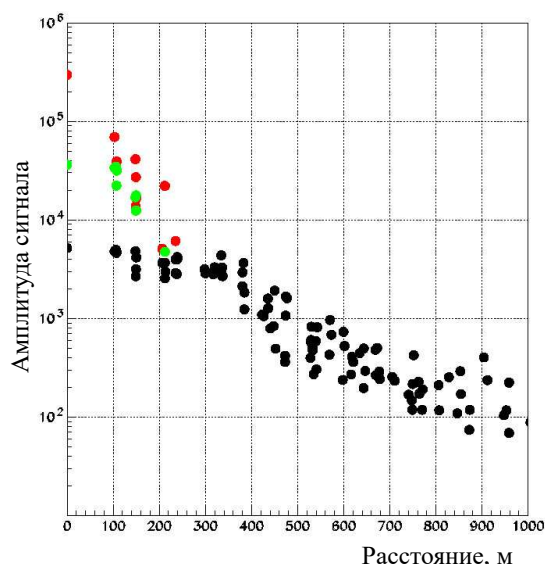


Рис. 2. Функция пространственного распределения черенковского света: зависимость амплитуды сигналов от расстояния до оси ливня. Черные (темные) точки — анодные сигналы, зеленые (светлые) — динодные сигналы, красные (серые) — сигналы от фотоумножителя с диафрагмой

Для решения этой проблемы и корректной регистрации событий с высокой плотностью фотонов были предложены и протестированы два метода. Оба они направлены на уменьшение светового потока на одном из четырех ФЭУ станции, превращая его в специализированный канал для измерения высоких интенсивностей света.

Первый подход заключается в механическом ослаблении светового потока. Осенью 2025 г. на оптических станциях первого кластера TAIGA-HiSCORE были проведены работы по установке диафрагм. Диафрагма устанавливалась перед входным окном конуса Винстона одного из ФЭУ станции. Диафрагма уменьшает эффективную площадь апертуры оптической системы и, тем самым, снижает интенсивность света, попадающего на фотокатод. Устанавливалась диафрагма с апертурой в 10 раз меньше эффективной площади входного окна конуса Винстона, что уменьшало световой поток в 10 раз. Соответственно это позволяет увеличить предел насыщения измерений в 10 раз для данного канала.

Второй подход заключается в замене одного из стандартных ФЭУ на фотоумножитель с значительно меньшей площадью фотокатода. В тестовом режиме на двух станциях первого кластера один из ФЭУ R5912 был заменен на ФЭУ XP1911UV [7]. Площадь входного окна его конуса в 178 раз меньше, чем у стандартного конуса TAIGA-HiSCORE. За счет этой значительно меньшей площади сбора света достигается существенное расширение динамического диапазона, которое по предварительным оценкам составляет 15–20 раз.

Настоящая работа посвящена рассмотрению метода оптического ослабления светового потока с помощью бленды (диафрагмы) на входе одного из ФЭУ установки. Конструкция установки показана на рис. 3.



Рис. 3. Станция TAIGA-HiSCORE с блендой, установленной на один фотоумножитель

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

Анализ проводился на основе экспериментальных данных, полученных с одной станции TAIGA-HiSCORE. На одном из ФЭУ была установлена диафрагма, ограничивающая поток света, в то время как остальные три работали в стандартном режиме. Общий объем данных составил 327 зарегистрированных событий. В обработке были использованы данные одного дня измерений. Остальные данные находились еще вне доступности для обработки — на полигоне TAIGA. Для ускорения обработки данных и получения значимого результата для коэффициента ослабления сигнала с диафрагмой использовались только данные с большой амплитудой сигнала в канале с диафрагмой.

На первом этапе обработки данных выполнялся визуальный анализ временных профилей анодных сигналов с целью исключения нефизических и шумовых. Далее для каждого канала проводилось вычитание фонового уровня, определяемого по медианному значению отсчетов вне области полезного сигнала.

Для определения информативного интервала сигнала использовалась обрезка шумовых хвостов импульса. Временные границы импульса определялись на основе среднеквадратичной огибающей, рассчитанной по трем неослабленным анодным каналам. Итоговый вид зарегистрированных данных для одного события представлен на рис. 4.

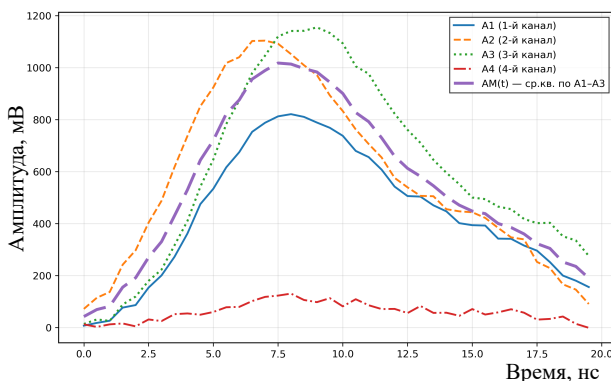


Рис. 4. Пример временных форм сигналов в четырех каналах после вычитания фонового уровня, временной обрезки и вычисления среднеквадратичной огибающей для неослабленных анодных сигналов

3. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОЭФФИЦИЕНТА ОСЛАБЛЕНИЯ

Для каждого события i коэффициент ослабления определялся как отношение интегральной амплитуды сигнала, восстановленной по трем неослабленным анодным каналам, к интегральной амплитуде сигнала

в ослабленном канале с диафрагмой:

$$K_i = \frac{S_{\text{rms},i}}{S_{4,i}}. \quad (1)$$

Здесь

$$S_{4,i} = \sum_{n=n_1}^{n_2} A_{4,i}(t_n), \quad (2)$$

где $S_{4,i}$ — интегральная амплитуда сигнала в ослабленном канале, а

$$S_{\text{rms},i} = \sum_{n=n_1}^{n_2} A_{\text{rms},i}(t_n) \quad (3)$$

— интегральная амплитуда среднеквадратичной огибающей трёх неослабленных каналов. Величины $A_{1,i}(t_n)$, $A_{2,i}(t_n)$, $A_{3,i}(t_n)$ и $A_{4,i}(t_n)$ представляют собой значения сигналов после вычитания фонового уровня в n -м отсчёте временного окна $[n_1, n_2]$, соответствующего полезному импульсу. Среднеквадратичная огибающая вычислялась по формуле

$$A_{\text{rms},i}(t_n) = \sqrt{\frac{A_{1,i}^2(t_n) + A_{2,i}^2(t_n) + A_{3,i}^2(t_n)}{3}}. \quad (4)$$

Использование именно среднеквадратичной огибающей, а не простого арифметического среднего, обусловлено тем, что в данной задаче она даёт более устойчивую сводную характеристику трёх неослабленных каналов. Такая величина симметрично учитывает вклад всех трёх ФЭУ и в меньшей степени занижается в тех событиях, где амплитуда одного из каналов оказывается меньше двух других из-за статистических флуктуаций, различия коэффициентов усиления или особенностей формы импульса. Поэтому величина $S_{\text{rms},i}$ использовалась как эталонная оценка неослабленного сигнала для данного события.

В анализ включались только события, для которых сигнал в ослабленном канале статистически значимо превышал шум. Для этого по досигнальному участку ослабленного канала длиной 120 отсчётов оценивался уровень шумовых флуктуаций. Пусть $x_{i,j}$ — значения отсчётов этого участка для события i . Тогда робастная оценка стандартного отклонения шума определялась через медианное абсолютное отклонение:

$$\sigma_{4,i} = 1.4826 \cdot \text{median} |x_{i,j} - \text{median}(x_{i,j})|. \quad (5)$$

Если длительность полезного сигнала для события i составляла N_i отсчётов, то характерный уровень шумового вклада в интегральную амплитуду оценивался как

$$\sigma_{S,i} = \sigma_{4,i} \sqrt{N_i}. \quad (6)$$

Критерий отбора записывался в виде

$$S_{4,i} > m \sigma_{S,i}, \quad (7)$$

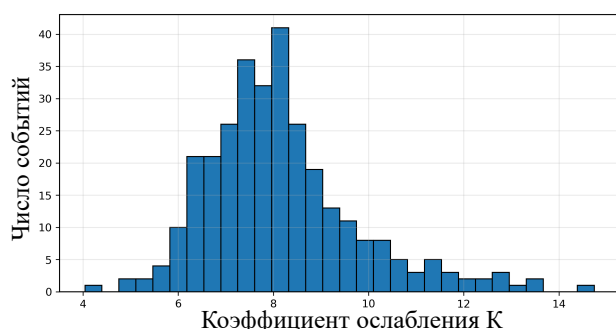


Рис. 5. Гистограмма распределения коэффициента ослабления K_i по событиям после отбора по критерию $S_{4,i} > 8\sigma_{S,i}$ и условию $K_i > 0$

где m — пороговый коэффициент. Дополнительно рассматривались только события с $K_i > 0$.

Устойчивость результата была проверена при $m = 6, 8$ и 10 : доля событий, прошедших отбор, составила 96.3%, 94.2% и 90.8% соответственно, а итоговая оценка коэффициента ослабления изменялась лишь на уровне порядка 1%. В дальнейших расчётах использовалось значение $m = 8$. Гистограмма распределения K_i по событиям после такого отбора приведена на рис. 5.

В качестве итоговой характеристики коэффициента ослабления использовалась медиана распределения K_i :

$$K_{\text{med}} = \text{median}(K_i), \quad (8)$$

поскольку она устойчива к выбросам и асимметрии распределения. Статистическая неопределённость медианной оценки определялась методом бутстрэпа: из исходной выборки многократно формировались псевдо-выборки того же объёма с возвращением, для каждой из них вычислялась медиана, после чего по распределению полученных значений оценивался доверительный интервал. В результате для исследуемой выборки получено

$$K_{\text{med}} = 7.9 \pm 0.1. \quad (9)$$

Полученное значение показывает, что реальный коэффициент ослабления сигнала в канале с диафраг-

мой близок к ожидаемому значению порядка 10, но несколько ниже него.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был рассмотрен и проанализирован метод расширения динамического диапазона измерений оптических станций установки TAIGA-HiSCORE путем оптического ослабления светового потока с помощью диафрагмы. Показано, что данный метод позволяет сохранить линейность регистрации сигналов при более высоких энергиях без изменения электронной части детектора. Коэффициент ослабления получился заниженным относительно ожидаемого, что объясняется геометрическими факторами. Один из вкладов вносит перераспределение светового потока в области диафрагмы из-за особенностей геометрии конуса Винстона: под блендой эффективная площадь входной области конуса больше, поэтому часть света проходит по траекториям, которые ослабляются слабее, чем в идеализированной модели. Также бленда лежала на входной апертуре не вплотную, что приводило к нежелательной засветке. Тем не менее результаты подтверждают эффективность использования данного метода.

Предложенный метод может быть использован при модернизации существующих станций TAIGA-HiSCORE и при разработке новых оптических модулей. Дальнейшие исследования могут быть направлены на уменьшение влияния геометрических факторов или же на применение метода к большему количеству установок.

Работа выполнена на УНУ «Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ», поддержана Российским научным фондом: проект РНФ 23-72-00016 и проект № 23-72-00019 «Разработка и тестирование подходов для расширения диапазона линейности оптических станций установки TAIGA-HiSCORE для измерения спектра космических лучей при энергии выше 10^{17} эВ»

-
- [1] Prosin V. V., Astapov I. I., Bezyazeev P. A. et al. // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. **83**. N 8. 1016 (2019).
[2] Tluczykont M., Bruckner M., Budnev N. et al. // *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. **1**. N 1. 283 (2014).
[3] Prosin V. V., Astapov I. I., Bezyazeev P. A. et al. // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. **89**. N 6. 907 (2025).
[4] Hamamatsu Photonics K.K. Photomultiplier tube R5912. Available at: http://neutron.physics.ucsb.edu/docs/R5912_8inch.pdf.
[5] Budnev N. et al. In: 16th Vienna Conference on Instrumentation (VCI2022), ed. by D. Bortoletto, R. Klanner, P. Krizan et al. // *Nucl. Instrum. Meth. A*. **1039**. 167047 (2022).
[6] Ternovoy M. Yu. // *Proc. 39th International Cosmic Ray Conference (ICRC2025)*, PoS(ICRC2025)206. (2025).
[7] Волчугов П. А., Астапов И. И., Безъязыков П. А. и др. // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. **56**. Вып. 3. 1062 (2025).

Expansion of the measurement range of the TAIGA-HiSCORE optical stations for cosmic ray research at energies above 10^{17} eV

E. R. Oganezian^{1a}, E. E. Korosteleva^{1,2b}

¹*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

²*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics Lomonosov Moscow State University, Moscow 119191, Russia*

E-mail: ^aoganezian.er22@physics.msu.ru, ^belkrs@yandex.ru

In this work, a method for extending the dynamic range of optical stations of the TAIGA-HiSCORE array for the detection of Cherenkov light flashes produced by extensive air showers (EAS) is considered. The aim of this study is to improve the accuracy of cosmic-ray spectrum reconstruction at energies above 10^{17} eV by increasing the linearity of photomultiplier signals. The approach is based on attenuating the light flux using diaphragms installed on one of the station photomultipliers. The first results of the data analysis are presented.

PACS: 95.55.Vj, 96.50.S-

Keywords: TAIGA-HiSCORE, Cherenkov radiation, dynamic range.

Received 2026.

Сведения об авторах

1. Оганезян Ева Руслановна — студент 4 курса специалитета кафедры физики космоса физического факультета МГУ; e-mail: oganezian.er22@physics.msu.ru.
2. Коростелева Елена Евгеньевна — канд. физ.-мат. наук, ст.й науч. сотрудник; e-mail: elkrs@yandex.ru.