

Анализ хода луча отражённого от снега черенковского света широкого атмосферного ливня в телескопе СФЕРА-3

Т. А. Колодкин,^{*} В. И. Галкин[†]

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики космоса
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
(Поступила в редакцию 09.06.2024; подписана в печать 24.07.2024)

В статье проведён анализ влияния телескопа отраженного черенковского света в проекте СФЕРА-3 на геометрию образа. Рассмотрено сжатие геометрии образа на краях мозаики и неравномерность освещённости мозаики. Путём аппроксимации полученных данных и их сравнения с неискаженными данными были получены корректирующие функции, которые будут применяться при построении образа.

PACS: 96.50.sb, 96.50.sd

УДК: 524.1

Ключевые слова: первичные космические лучи, широкие атмосферные ливни, черенковский свет, учёт искажений.

ВВЕДЕНИЕ

Первичные космические лучи (ПКЛ) — потоки заряженных частиц высокой энергии, которые приходят к Земле со всех сторон космического пространства и бомбардируют её атмосферу. Для изучения механизма ускорения частиц исследуется химический состав ПКЛ и энергия [1]. При взаимодействии первичных частиц с энергией больше 10^{15} эВ с частицами атмосферы образуются широкие атмосферные ливни (ШАЛ). Из анализа ШАЛ можно получить информацию об энергетическом спектре и массовом составе космических лучей в диапазоне энергий 10^{15} — 10^{20} эВ. Параметры первичной частицы определяются на основе характеристик вторичных частиц и их излучений. Для их измерения используются детекторы, размещённые на земной поверхности. Согласно методу А.Е. Чудакова [2] определить характеристики первичной частицы можно, измеряя пространственно-временную структуру черенковского света ШАЛ, отраженного от снега. Проект СФЕРА [3–10] основан на методе А.Е. Чудакова для оценки энергии, направления и массового состава первичной частицы в области энергий выше 10^{15} эВ. В эксперименте СФЕРА-2 помимо отраженного света был зафиксирован и прямой черенковский свет ШАЛ. На основе этого результата возникла идея проекта СФЕРА-3, в котором планируется одновременная детекция как отраженного, так и прямого черенковского света. Ожидается повышение точности определения параметров первичных частиц. Планируется, что отражающей поверхностью будет выступать снежная поверхность озера Байкал, а телескоп будет подниматься БПЛА.

1. ВЛИЯНИЕ ТЕЛЕСКОПА НА ФОРМУ ОБРАЗА

Телескоп отраженного черенковского света состоит из входной диафрагмы с линзой корректором, асферического зеркала и мозаики. После падения черенковского света на снег его отраженная часть попадает на входное окно и, отражаясь от зеркала, освещает мозаику. Зеркало вносит искажение в образ так, что дальнейшая аппроксимация образа аксиально-симметричной функцией приводит к неверной оценке первичной массы, и чем дальше находится образ от оси телескопа, тем больше искажения. Помимо этого, поскольку мозаика перекрывает часть лучей вблизи оси телескопа, освещённость вблизи оси и на краях мозаики будет ниже. Чтобы устранить искажения, необходимо их скомпенсировать. В проекте СФЕРА-2 тоже анализировались искажения телескопом [11] и было показано, что их учёт уменьшает ошибку классификации [12].

2.1. Сжатие геометрии на краях мозаики

Зависимость расстояния «ось телескопа — центр масс образа точки» на мозаике от расстояния «ось телескопа — точка» на снегу

Прежде всего необходимо получить связь расстояния от оси оптической системы до объекта на снегу с аналогичным расстоянием до образа объекта на мозаике телескопа. Ситуация осложняется тем обстоятельством, что фотоны, исходящие из одной точки на снегу, попадают в разные точки входного окна и достигают мозаики в разных точках, если вообще доходят до нее. Распределение этих фотонов на мозаике зависит от свойств оптической системы, но оно всегда имеет конечные размеры и может быть приближенно представлено одной точкой, например, центром тяжести. Мы фактически ищем связь именно расстояния до центра тяжести образа точки на мозаике от рассто-

* tka002@mail.ru

† v_i_galkin@mail.ru

яния до самой точки на снегу. Поскольку оптическая система почти аксиально симметрична (точная симметрия нарушается только структурой мозаики), мы получаем эту зависимость не для точки, а для кольца на снегу, тем самым производя усреднение по азимуту. Процедура выглядит следующим образом. Рассматривается круг радиуса 500 м на снежной поверхности. Круг разбивается на кольца с шагом по радиусу 10 м. В качестве радиуса кольца берется его средний радиус R . Из каждого кольца посылается по 10 тысяч фотонов на модель телескопа, находящуюся на высоте 1 км, так, что получается образ этого кольца на мозаике. Затем строится распределение расстояний образов точек кольца для каждого R , центр тяжести этого распределения называется ρ , совокупность всех пар $\rho-R$ дает искомую зависимость (рис. 1). Точки на снегу, удаленные от оси дальше чем на 360 м, не имеют локализованного образа на мозаике, фотоны из них иногда попадают на мозаику в результате переотражения, поэтому мы можем использовать аппроксимацию только до этого расстояния.

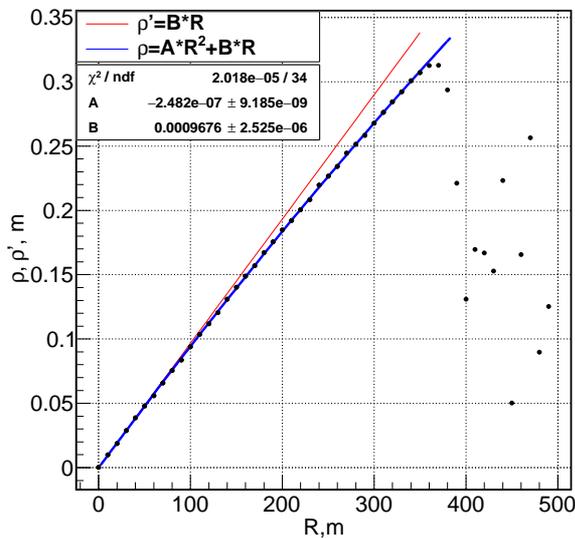


Рис. 1. Зависимость расстояния между осью телескопа и центром масс образа от радиуса кольца

Корректирующая функция

Зависимость расстояния от оси телескопа до центра масс от радиуса кольца $\rho = \rho(R)$ аппроксимируется полиномом второй степени (синяя кривая). В силу геометрической оптики в точке $R=0$ искажений нет. Неискаженное расстояние ρ' связано с R прямой пропорциональностью, $\rho' = \rho'(R)$, и представлено на рис. 1 красной прямой, касательной к квадратичной функции в точке $R = 0$. Для исправления сжатия геометрии необходимо превратить квадратичную зависимость

в прямую. Для этого была построена корректирующая функция $\rho' = \rho'(\rho)$, линейризующая геометрию на мозаике (рис. 2).

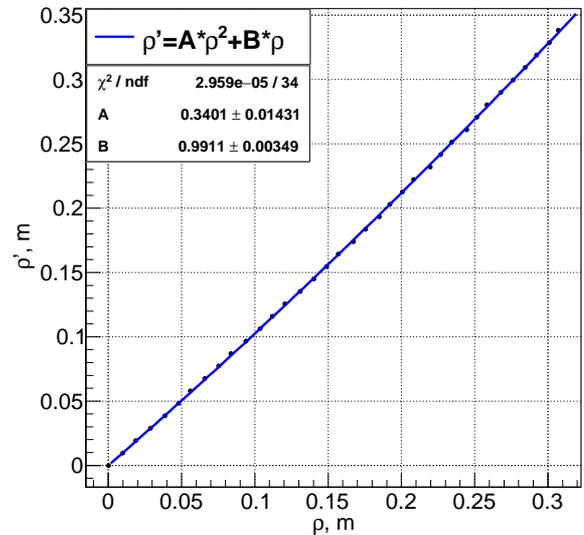


Рис. 2. Корректирующая функция для линейризации геометрии

Эффективный рост площади фотосенсора

Как видно из рис. 1, линейризованное расстояние больше исходного ($\rho' > \rho$), что означает эффективное сжатие светового потока оптикой телескопа на удалении от его оси чем дальше, тем больше. То есть при изотропном потоке фотонов на входном окне (без учета перекрытия потока конструкциями телескопа и эффектов от линзы корректора) на одну и ту же площадь пикселя мозаики на краю приходится больше света, чем в центре. Чтобы учесть этот эффект, пришедшее в пиксель количество фотонов необходимо уменьшить в $K(\rho)$ (рис. 3) раз:

$$K(\rho) = \frac{dS'}{dS} = \frac{\rho' d\rho' d\phi}{\rho d\rho d\phi} = \frac{\rho' d\rho}{\rho d\rho}$$

2.2. Искажения в освещённости мозаики

Искажения телескопа не ограничиваются только геометрией, есть еще краевые эффекты: эффекты перераспределения потока корректором и эффекты перекрытия потока мозаикой. Их можно оценить, создав равномерную освещенность снежной поверхности. Равномерно

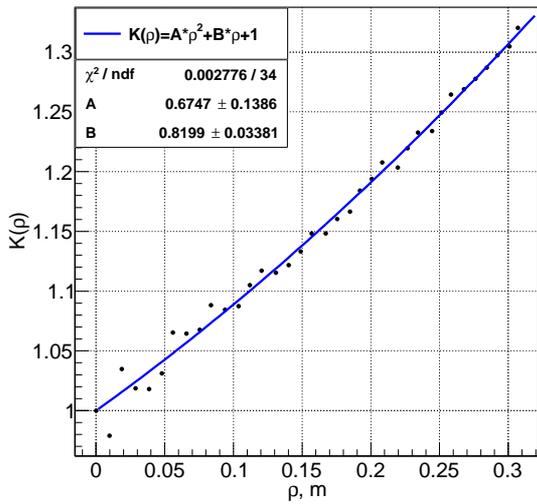


Рис. 3. Зависимость коэффициента роста эффективной площади от расстояния от оси телескопа до центра масс образа на мозаике

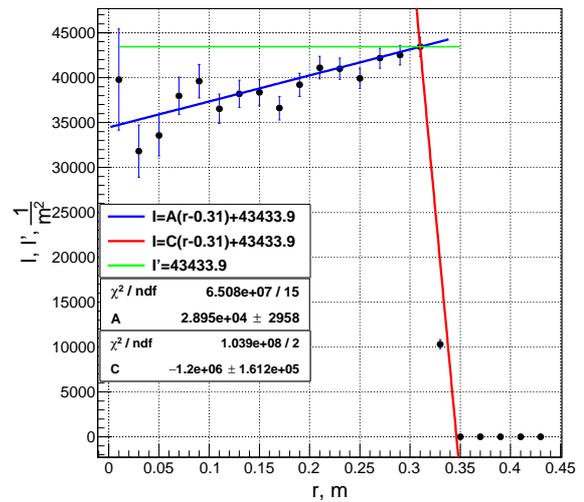
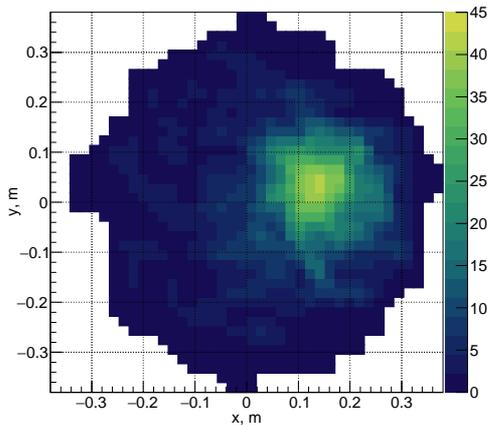
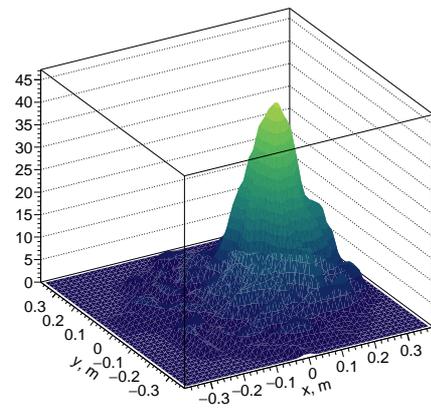


Рис. 4. Зависимость коэффициента роста эффективной площади от расстояния от оси телескопа до центра масс образа на мозаике



а



б

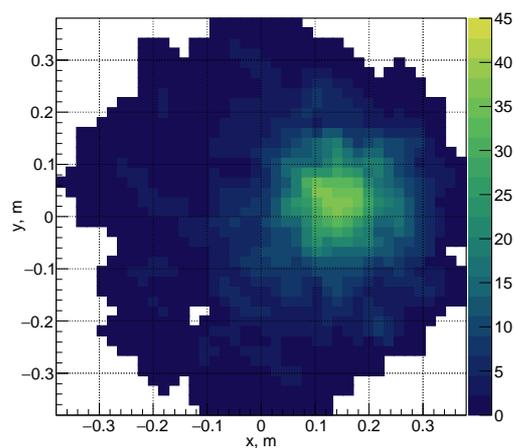
Рис. 5. Образ без учёта искажений

распределим 100 тысяч фотонов на снежной поверхности радиуса 1000 м и направим их на телескоп черенковского света, находящегося на высоте 1 км. Разобьем мозаику на кольца с шагом радиуса 2 см и построим зависимость (рис. 4) освещённости от радиуса кольца на мозаике. Виден существенный провал в центре мозаики, обусловленный перекрытием части светового потока мозаикой, размещенной между диафрагмой (входным окном) телескопа и зеркалом, а также резкий обрыв на краю мозаики.

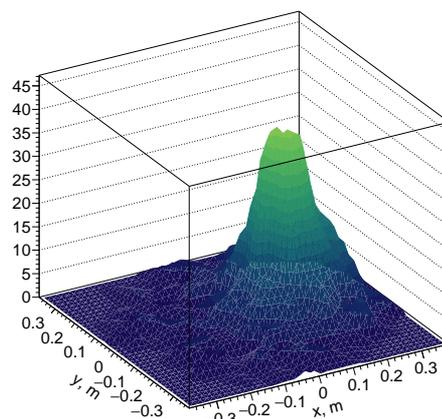
Зависимость аппроксимируется синей прямой для $r \leq 0.31$ м и красной прямой для $r > 0.31$ м. Для того, чтобы освещённость была равномерной, необходимо привести зависимости к Γ' -максимальному значению освещённости. Для этого нужно число фотонов умножить на величину $F(r) = \frac{\Gamma'}{\Gamma(r)}$.

2. ПРИМЕР КОРРЕКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

На рис. 5–8 в разных проекциях последовательно представлен черенковский образ ШАЛ от протона с энергией 10ПэВ до исправления искажения (рис. 5), этот же образ после исправления искажений геометрии (рис. 6) и этот же образ после корректировки геометрии и эффективной площади (рис. 7). Также после всех исправлений добавлена корректировка освещённости (рис. 8). На рисунке 6а) видно, что образ стал более широким. На рис. 7а) видно уменьшение освещённости. Как итог, после учета этих типов искажений образ стал более симметричным (рис. 8). Графики несут исключительно иллюстративный характер, количественное влияние искажений будет видно в будущих работах по разделению масс.

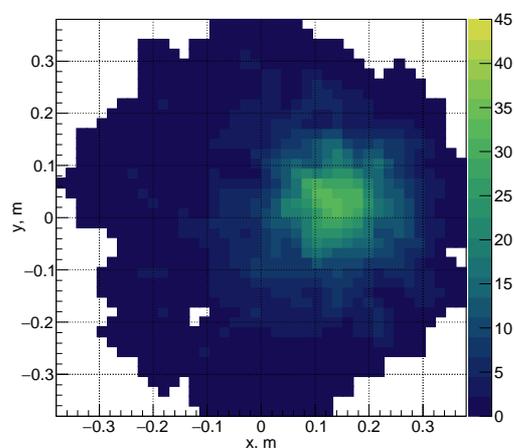


а

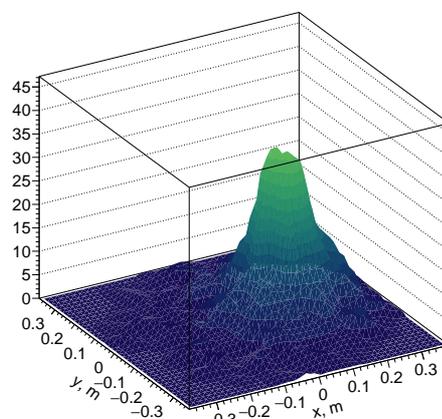


б

Рис. 6. Образ с коррекцией сжатия геометрии на краях мозаики.

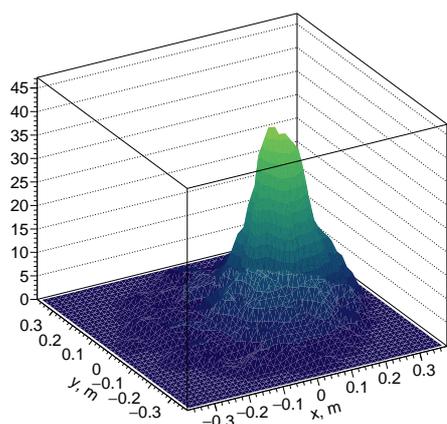


а

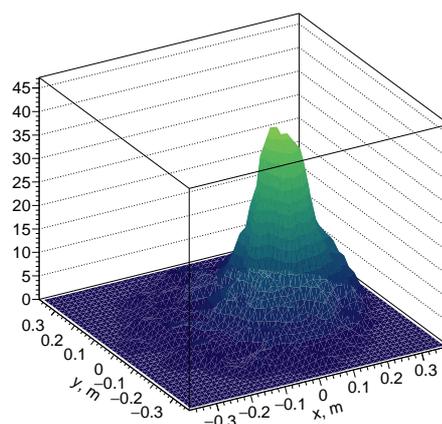


б

Рис. 7. Образ с коррекцией сжатия геометрии на краях мозаики и роста эффективной площади.



а



б

Рис. 8. Образ с коррекцией сжатия геометрии на краях мозаики, роста эффективной площади и неравномерности освещённости мозаики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для последующего анализа образов ШАЛ, полученных с помощью телескопа отраженного света в СФЕРА-3, требуется учёт искажений. В работе были получены корректирующие функции для трёх искажений: нелинейность зависимости расстояния от оси телескопа до точки изображения от расстояния от оси до источника на снегу, эффективный рост площади, возникающий при устранении сжатия геометрии, и неравномерность засветки мозаики. После учета искажений изображение черенковского пятна на снегу будет аппроксимироваться аксиально-симметричной модельной функцией. На основании этой аппроксимации будет вычисляться параметр формы распределения, чувстви-

ющий массу первичного ядра. Кроме того, учет искажений поможет в построении оценки первичной энергии и при определении направления оси ливня.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Российскому Научному Фонду (грант РФФ № 23-72-00006) за поддержку работы. Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова [13].

-
- [1] Thoudam S., Rachen J.P., van Vliet A. et. al. // *A&A*. **595**, A33 (2016).
- [2] Chudakov A // A possible method to detect EAS by the Cherenkov radiation reflected from the snowy ground surface. In Proceedings of the All-Union Symposium of Experimental Methods of Studying Cosmic Rays of Superhigh Energies. Yakutsk, 1972. Yakutsk Division, Siberian Branch, USSR Academy of Science: Yakutsk, Russia, 1974. 620, 69. (In Russian)
- [3] Antonov R.A., Ivanenko I.P., Kuz'min V.A., Fedorov A.N. // Balloon setup for measuring energy spectrum of primary cosmic rays in the energy range from 10^{15} eV to several units of 10^{20} eV. In Investigations with High Altitude Balloons. Brief Communications on Physics (LPI, Moscow, 1989), 78.
- [4] Anokhina A.M., Antonov R.A., Bonvech E.A. et. al. // Experiment SPHERE-2 status 2007. In: Proc. 30ICRC. (2008). Merida, 5, 945.
- [5] Antonov R.A., Anokhina A.M., Bonvech E.A. et. al. // Proceedings of 31st ICRC, 4. Lodz, 2009.
- [6] Galkin V.I. Dzhatdov T.A. // *Mosc. Univ. Phys. Bull.* **65**, N 3. 195. (2010).
- [7] Antonov R.A., Aulova T.V., Bonvech E.A. et. al. // *Physics of Particles and Nuclei*. **46**, N 1. 60. (2015).
- [8] Bonvech E.A., Galkin V.I., Dzhatdov T.A. et. al. // *Bull. RAS: Physics*. 83. 995 (2019).
- [9] Chernov D.V., Bonvech E.A., Finger M. et. al. // *Journal of Instrumentation*. 15, N 09. 1. (2020).
- [10] Bernloehr, K., Carrol, O. Cornils R. et. al. // *Astropart. Phys.* 20. 111. (2003).
- [11] Азра К. and Галкин В. И. // Ученые записки физического факультета Московского Университета. N 4, 2241602 (2022).
- [12] Латыпова В.С. // Универсальные критерии разделения широких атмосферных ливней по первичной массе для черенковского телескопа типа СФЕРА. Магистерская диссертация 2023 г, кафедра Физики Космоса, физический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова.
- [13] Voevodin V.I., Antonov A., Nikitenko D. et. al. // *Supercomputer Lomonosov-2: Large Scale*.

Analysis of the beam path of Cherenkov light of extensive air shower reflected from the snow surface in the SPHERE-3 telescope

T. A. Kolodkin^a, V. I. Galkin^b

¹Department of Space Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia

E-mail: ^atka002@mail.ru, ^bv_i_galkin@mail.ru

The article analyses the influence of the reflected Cherenkov light telescope in the SPHERE-3 project on the image geometry. The compression of the image geometry at the edges of the mosaic and the unevenness of the mosaic illumination are considered. By approximating the obtained data and comparing them with undistorted data, correcting functions were obtained that will be used when constructing the image.

PACS: 96.50.sb, 96.50.sd.

Keywords: primary cosmic rays, extensive air showers, Cherenkov light, distortion accounting.

Received 09 June 2024.

Сведения об авторах

1. Колодкин Тимофей Андреевич — студент; тел.: (495) 939-36-06, e-mail: tka002@mail.ru.
2. Галкин Владимир Игоревич — доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор; тел.: (495) 939-36-06, e-mail: v_i_galkin@mail.ru.