

Вычисление и аппроксимация оптических искажений телескопа СФЕРА–3

К. Ж. Азра,* 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 17.05.2022; подписана в печать 19.08.2022)

Изучены оптические искажения серии телескопов СФЕРА. Сферическое зеркало создает на мозаике телескопа изображение искаженной формы по сравнению с формой изображаемого объекта. Искажения тем больше, чем дальше расположен объект от оси зеркала. Фактически происходит сжатие пространства изображения в радиальном направлении. Эти искажения мешают дальнейшей обработке образов ШАЛ, регистрируемых мозаикой ФЭУ телескопа. Возникает необходимость компенсировать эти искажения образов, чтобы приблизить их форму к форме изображаемых объектов, в нашем случае — пятен черенковского света на снегу от ШАЛ.

PACS: 96.50.sb, 96.50.sd УДК: 524.1

Ключевые слова: первичные космические лучи, широкие атмосферные ливни, черенковский свет, статистическое моделирование, аппроксимация.

ВВЕДЕНИЕ

Первичные космические лучи (ПКЛ) — потоки заряженных частиц высокой энергии, которые приходят к Земле со всех сторон из космического пространства и постоянно бомбардируют её атмосферу. В составе космических лучей преобладают протоны, имеются также электроны, ядра гелия и более тяжёлых химических элементов, имеются также электроны, позитроны, антипротоны. Космические лучи галактического и метagalacticкого происхождения занимают огромный диапазон энергий, охватывающий примерно 15 порядков величины, — от 10^6 до 10^{20} эВ. Возникает вопрос о природе частиц с энергиями больше 10^{17} эВ. Одной из главных проблем теории происхождения космических лучей является механизм их ускорения, одним из способов изучения которого является исследование химического (массового) состава ПКЛ, поскольку изменение состава с энергией позволяет различать механизмы ускорения [1].

При взаимодействии первичной частицы сверхвысокой энергии (скажем, с энергией больше 10^{15} эВ) с частицами атмосферы образуются широкие атмосферные ливни (ШАЛ). Традиционная цель наблюдений ШАЛ — изучение характеристик элементарного акта ядерного взаимодействия при высоких энергиях [2–4]. Наряду с этим, ШАЛ дают информацию об энергетическом спектре и массовом составе космических лучей при энергиях 10^{15} – 10^{20} эВ, что очень важно для поиска источников и механизмов ускорения космических лучей. В настоящее время астрофизическая проблематика преобладает в экспериментах, регистрирующих ШАЛ.

Определение параметров первичной частицы обычно осуществляется на основании измерений характе-

ристик вторичных частиц и их излучений детекторами, размещенными на земной поверхности. Это также можно делать по измерениям пространственно-временной структуры черенковского света ШАЛ, отраженного от снега, — по методу, предложенному А.Е. Чудаковым в 1972 г. [5].

Подобная методика непрямых измерений, несмотря на ряд преимуществ, не получила в настоящее время широкого распространения. Впервые она была реализована в Альпах в 70х–80х годах прошлого века итальянскими исследователями [6]. Была получена оценка энергетического спектра ПКЛ, но исследования продолжены не были. Вся дальнейшая история метода связана с деятельностью экспериментальной группы Р.А. Антонова в НИИЯФ МГУ [7–9].

СФЕРА — серия телескопов для регистрации широких атмосферных ливней по черенковскому свету, отраженному от снежной поверхности [7–12], для оценки энергии, направления и массового состава первичной частицы в области энергий выше 10^{15} эВ [13, 14].

Первая установка типа СФЕРА была построена в горах Тянь-Шаня над Большим Алма-Атинским озером. Затем были два телескопа, поднимавшиеся над снежной поверхностью на аэростатах. Новый проект СФЕРА–3 предполагает использование дрона в качестве носителя.

1. ХАРАКТЕР И МАСШТАБ ИСКАЖЕНИЙ В ТЕЛЕСКОПЕ СФЕРА–3

Оптическая система телескопа в простейшем варианте состоит из сферического зеркала радиуса 1100 мм (радиус кривизны 1400 мм), «мозаики» — сферического сегмента — радиуса 340 мм (радиус кривизны 750 мм) и входной диафрагмы радиуса 660 мм. Центры кривизны зеркала и мозаики совпадают, плоскость диафрагмы удалена на 100 мм от этой точки вдоль оси системы в направлении от мозаики. Телескоп располо-

* clemenceanastasia@gmail.com

† v_i_galkin@mail.ru

жен на высоте 1000 м над снежной поверхностью. Время жизни ШАЛ в черенковском свете составляет всего несколько микросекунд. Поэтому можно считать, что телескоп, регистрирующий поперечное распределение ШАЛ на снегу, находится в неподвижном состоянии во время регистрации ливня.

Часть падающего на снег черенковского света диффузно отражается от него, небольшая его доля достигает входного окна телескопа и перенаправляется сферическим зеркалом на сферическую поверхность с размещенными на ней фотоэлектронными умножителями. Последние составляют мозаику телескопа, регистрирующую черенковский образ ШАЛ [15]. Чувствительные элементы мозаики покрывают несущую ее поверхность не полностью, черенковский образ состоит из конечного числа элементов. Например, телескоп СФЕРА-2 имел мозаику из 109 ФЭУ. Мозаика вновь создаваемого телескопа СФЕРА-3 будет гораздо более детальной (2000–3000 пикселей) и плотной, но его конструкция на настоящий момент не определена. Для выбора оптимальной конструкции необходимо провести моделирование событий ШАЛ и процесса их регистрации несколькими конфигурациями телескопа, по полученным черенковским образам ШАЛ надо восстановить первичные параметры ливней. Оптимальным будет считаться вариант конструкции, дающий минимальные неопределенности оценок параметров. Перед телескопом СФЕРА-3 поставлена задача получить наивысшее возможное разрешение по массе первичного ядра, поэтому именно оно будет определяющим при выборе конструкции.

Большая часть событий ШАЛ, регистрируемых телескопами СФЕРА, имеют небольшие зенитные углы, как правило, в пределах 25° . В этом случае поперечное распределение черенковского света на снегу имеет аксиальную симметрию. Исходя из этого факта, при обработке образов ШАЛ в телескопе используется аксиально-симметричная аппроксимация, однако, сферическое зеркало нарушает эту симметрию тем больше, чем дальше от оси телескопа расположен образ. Эти искажения образа влияют на оценку первичной массы, использующую его форму. Для восстановления аксиальной симметрии образа возникает необходимость компенсировать вносимые зеркалом искажения. Заметим, что характер и масштаб искажений зависят в первую очередь от формы зеркала и положения объекта относительно его оптической оси, поэтому их можно исследовать отдельно от конфигурации мозаики.

Для наглядной демонстрации искажений сферического зеркала распределения черенковского света на снегу представлены в виде окружностей, поскольку поперечное распределение имеет аксиально-симметричную форму для ливней с небольшим зенитным углом. Ниже представлена схема эксперимента. Если центр окружности совпадает с осью телескопа, сдвиг окружности равен нулю. В случае, когда ливень падает на некотором расстоянии от оси телескопа, мы

фиксируем ненулевой сдвиг. Ниже приведен пример сдвига на 200 м (рис. 1 и 2).

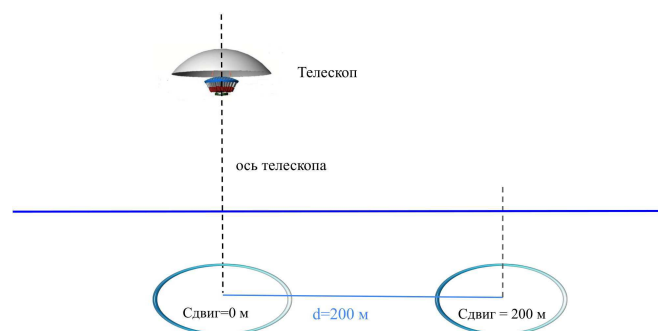


Рис. 1. Схема эксперимента

Поперечное распределение черенковского света представлено схематически в виде окружности из 100 точек, из каждой точки выходит по 10^4 лучей. Часть этих лучей попадает на мозаику и образует облака точек образа.

При сдвиге изображение центров тяжести облаков сжимается в направлении сдвига и теряет форму окружности (рис. 2). Данная деформация является прямым следствием искажений, производимых сферическим зеркалом.

Если центры овалов центров тяжести изображений совместить, легко видеть характер и масштаб деформаций изображения поперечного распределения черенковского света ШАЛ при сдвиге относительно оси телескопа.

2. ПОЛУЧЕНИЕ КОРРЕКТИРУЮЩИХ ФУНКЦИЙ

2.1. Коррекция радиальной нелинейности образа

Рассмотрим последовательность точек-объектов на снегу, удаляющихся от оси с постоянным шагом, и последовательность центров тяжести облаков их точек-изображений (далее — просто точек-изображений). Расстояния от оси до точек на снегу обозначим через r , а расстояния от оси до точек-изображений — через ρ . На рис. 3, а последовательности представлены в виде точек с координатами (r, ρ) , через которые проведена красная кривая — зависимость $\rho(r)$. На оси ($r = 0$) искажений изображения нет, и мы можем провести искомого зависимость (синяя прямая) линеаризованного расстояния ρ' от оси до изображения как касательную к красной кривой в точке $r = 0$. Для коррекции образа нужно использовать функцию, связывающую искаженное расстояние ρ и исправленное расстояние ρ' на мозаике, получаемую из кривой и прямой, соответственно (рис. 3, б).

Для коррекции изображения расстояния ρ от оси до сенсоров мозаики заменяются на $\rho'(\rho)$.

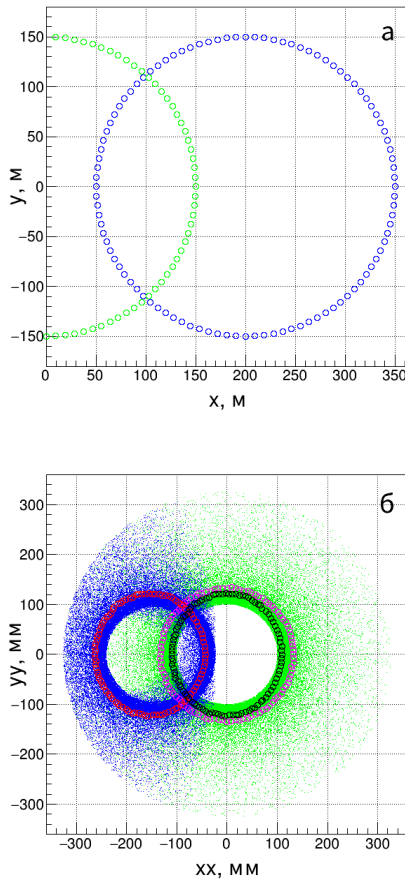


Рис. 2. Поперечное распределение ЧС на снегу и облака точек-образов на мозаике. Панель *a* схематически изображает два поперечных распределения черенковского света на снежной поверхности, зеленое с центром на оси и синее со сдвигом 200 м. Панель *б* представляет поля точек-изображений этих распределений-кругов, имеющие соответствующую цветов. Облако точек-изображений каждой точки на снегу представлено своим центром тяжести, центры тяжести образуют овалы на мозаике, приближенно описывающие изображения кругов на снегу. Красный овал представляет сдвинутый синий круг, фиолетовый — зеленый. Если центр красного овала совместить с центром фиолетового, получится черный овал, наглядно демонстрирующий искажения, обусловленные сферическим зеркалом: фиолетовый овал имеет форму круга, а черный кругом не является, к тому же он стал меньше по обеим осям

2.2. Эффективный рост площади фотосенсора при его удалении от оси

Запишем элемент площади фотосенсора в реальной полярной системе координат (ρ, φ) : $dS = \rho d\rho d\varphi$, где ρ расстояние на мозаике. Поскольку искажение идет по радиусу, в исправленной системе координат азимутальный угол тот же и элемент площади $dS' = \rho' d\rho' d\varphi$. В предыдущем параграфе были рассчитана связь ли-неаризованного расстояния ρ' и и исходного расстоя-

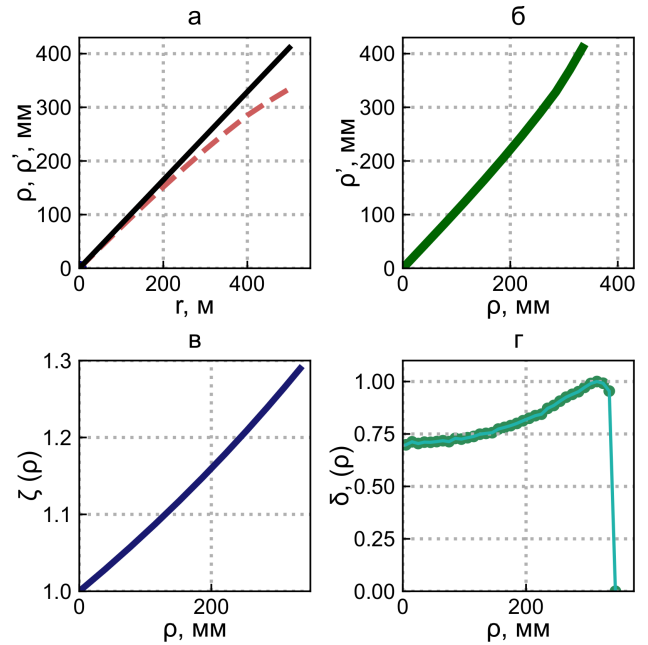


Рис. 3. Корректирующие функции. Панель *a*: графики зависимости расстояний ρ и ρ' от оси телескопа до изображения на мозаике от расстояния r от оси телескопа до точки на снегу. Штриховая красная линия — зависимость $\rho(r)$, сплошная черная прямая — касательная к красной кривой в нуле, представляющая зависимость $\rho'(r)$. Панель *б*: функция $\rho'(\rho)$, связывающая искаженное расстояние ρ и скорректированное расстояние ρ' на мозаике. Панель *в*: график зависимости коэффициента $\zeta(\rho)$ от расстояния ρ на мозаике. Панель *г*: относительная освещенность мозаики $\delta(\rho)$ в зависимости от расстояния ρ от ее центра

ния ρ на мозаике. Исправленное расстояние превосходит исходное, то есть коррекция должна сопровождаться увеличением расстояния ρ до расстояния ρ' , $\kappa(\rho) = \rho'/\rho \geq 1$. Следовательно, элемент площади после коррекции больше, то есть искажения сферического зеркала приводят к сжатию светового потока. Для новой коррекции требуется рассчитать отношение элементов площадей, на которое нужно поделить число фотонов в каждом ФЭУ. Таким образом, фотосенсор с центром на расстоянии ρ от оси имеет эффективную площадь больше в

$$\zeta(\rho) = \frac{dS'}{dS} = \frac{\rho' d\rho'}{\rho d\rho} = \frac{\rho'}{\rho} \cdot \frac{d\rho'}{d\rho}$$

раз, чем такой же фотосенсор с центром на оси. Тогда для коррекции изображения число фотонов/фотоэлектронов в нем надо уменьшить в $\zeta(\rho)$ раз (рис. 3,в).

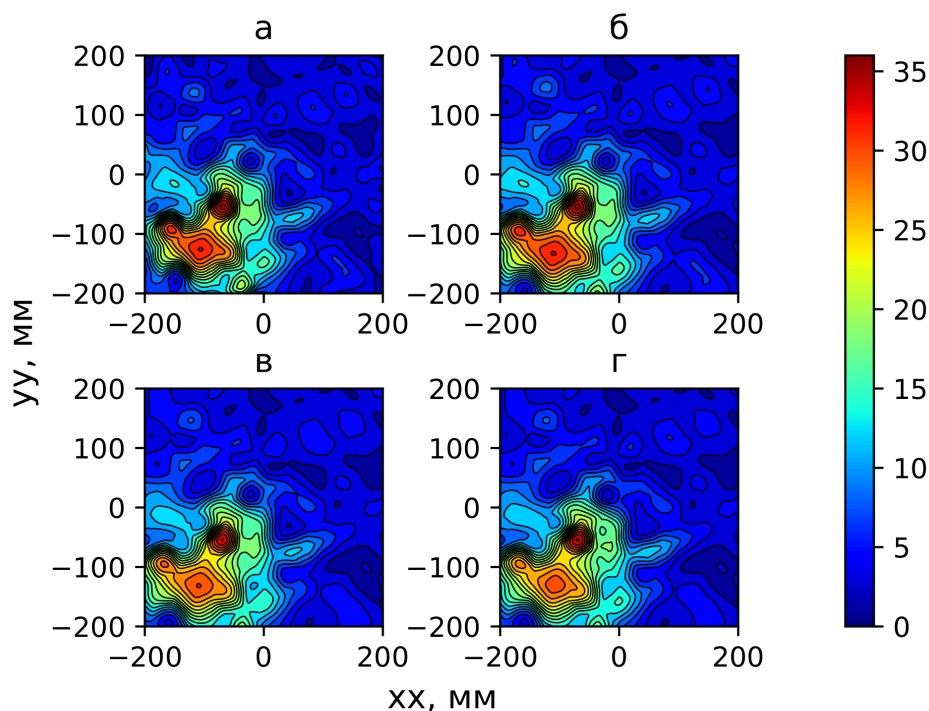


Рис. 4. Образ ШАЛ от протона 10 ПэВ с зенитным углом 15° на мозаике СФЕРЫ-3. Высота наблюдения 1000 м над уровнем снега

Панель а: исходный образ.

Панель б: образ после коррекции радиальной нелинейности.

Панель в: образ после учета эффективной площади фотосенсора.

Панель г: образ после коррекции освещенности.

2.3. Неравномерность освещенности поля зрения

Пусть снежная поверхность освещена равномерно, при этом освещенность мозаики зависит от расстояния ρ . Зависимость эта определяется геометрией оптической схемы, выбранной с помощью инструментальной программы OSLO [16], и должна быть учтена как еще одно искажение сферического зеркала. Ситуация была смоделирована следующим образом: на уровне снежной поверхности случайным образом выделялись точки, равномерно разбросанные в круге радиуса 520 м; из этих точек испускались лучи, пересекающие диафрагму телескопа в случайных равномерно распределенных по ней точках; далее лучи прослеживались через оптическую систему телескопа до их пересечения с мозаикой, при этом фиксировалось расстояние ρ точки пересечения. Столбцы полученной гистограммы с размером бина по ρ 1 см были поделены на средние ρ бинов и нормированы на максимальную освещенность. Результат — относительная освещенность $\delta(\rho)$ — приведен на рис. 3,г. 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.

3. ПРИМЕР КОРРЕКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ШАЛ

С помощью программного пакета CORSIKA [17] сгенерированы образы широких атмосферных ливней, которые образуют поперечное распределение черенковского света на снегу. Было выбрано типичное событие от первичного протона с энергией 10 ПэВ и зенитным углом 15° . Для высоты наблюдения 1 км телескопом СФЕРА-3 с помощью пакета Geant4 [18] рассчитано поперечное распределение черенковского света на мозаике, которое представлено в виде цветной карты (рис. 4,а), где интенсивность кодируется цветом. Эта карта демонстрирует исходный образ со всеми искажениями сферического зеркала. Последующие аналогичные карты показывают трансформации образа после коррекции очередного фактора.

После первой коррекции исходного образа (рис. 4,а) — радиальной линейризации, описанной в параграфе 3.1, — наблюдается вытягивание изображения (рис. 4,б): чем дальше от центра, тем больше оно вытягивается. Следующая коррекция (учет эффективной площади фотосенсора, параграф 3.2) приводит к уменьшению интенсивности, лучше всего заметному в центре образа, где интенсивность наивысшая (рис. 4,в). Коррекция освещенности (па-

раграф 3.3) несколько приподнимает области образа, лежащие ближе к центру мозаики (рис. 4,з).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ черенковских образов ШАЛ в поле зрения телескопов серии СФЕРА для решения задачи оценки массы первичных частиц требует учета искажений, вносимых зеркалом телескопа. В данной работе получены функции для устранения аберраций сферического зеркала телескопа СФЕРЫ-3, что необходимо для получения аксиально симметричной аппроксимации образа ливня. Были учтены 3 эффекта: нелинейность за-

висимости расстояния от оси до точки-изображения от расстояния от оси до точки-объекта на снегу, эффективный рост площади фотосенсора при его удалении от оси за счет фактического сжатия пучков света на периферии, и убывание яркости на краю поля зрения. Приведенные функции коррекции построены для СФЕРА-3, но подход справедлив и для других телескопов серии СФЕРА. У нас имеются аналогичные функции коррекции для телескопа СФЕРА-2 [19].

Рассмотренные функции коррекции будут использованы при обработке данных СФЕРА-2 [20] и разработке конструкции СФЕРА-3 [21], в частности, при построении критериев разделения первичной массы, основанных на форме черенковского пятна ШАЛ на мозаике.

-
- [1] *Thoudam S., Rachen J.P., van Vliet A. et al. // A&A. 2016. 595, A33.*
- [2] *Bayburina S.G., Borisov A.S., Cherdynitseva K.V. et al. // Nuclear Physics B. 1981. 191, Issue 1. P. 1.*
- [3] *Haungs A., Rebel H., Roth M. // Rep. Prog. Phys. 2003. 66. P. 1145.*
- [4] *Kampert K.H., Watson A.A. // EPJ. 2012. 37, P. 359.*
- [5] *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, P. 69. (In Russian)*
- [6] *Castagnoli C., Navarra G., Morello C. // Detection of EAS Cerenkov light reflected from mountain snow. In Proceedings of 17th International Cosmic Ray Conference. Paris, 1981. 6, P. 103.*
- [7] *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), P. 78.*
- [8] *Anokhina A.M., Antonov R.A., Bonvech E.A. et al. Experiment SPHERE-2 status 2007. In: Proc. 30ICRC. 2008. Merida, 5, P. 945.*
- [9] *Antonov R.A., Anokhina A.M., Bonvech E.A., Chernov D.V., Dzhatdov T.A., Galkin V.I., Kirillov A.A., Roganova T.M. // A method for primary proton spectrum measurement at $E_0 > 10$ PeV with SPHERE-2 telescope. Proceedings of 31st ICRC, 4. Lodz, 2009.*
- [10] *Galkin V.I., Dzhatdov T.A. // Mosc. Univ. Phys. Bull. 2010. 65, N 3. P. 195.*
- [11] *Antonov R.A., Aulova T.V., Bonvech E.A. et al. // Physics of Particles and Nuclei. 2015. 46, N 1. P. 60.*
- [12] *Bonvech E.A., Galkin V.I., Dzhatdov T.A. et al. // Bull. RAS: Physics. 2019. 83. P. 995.*
- [13] *Chernov D.V., Bonvech E.A., Finger M. et al. // Journal of Instrumentation. 2020. 15, N 09. P. 1.*
- [14] *Bernloehr, K., Carrol, O. Cornils R. et al. // Astropart. Phys. 2003. 20. P. 111.*
- [15] *Antonov, R.; Bonvech, E.; Chernov, D. et al. // Astropart. Phys. 2019. 108. P. 24.*
- [16] OSLO Optics Reference, Lambda Research Corporation, www.lambdare.com
- [17] *Heck D., Pierog T. CORSIKA User's Guide. Karlsruhe Institut fur technologie. 2011.*
- [18] *Geant4 Collab. Geant4 User's Guide for Application Developers. <https://geant4.web.cern.ch>.*
- [19] *Antonov R., Bonvech E., Chernov D., Dzhatdov T. et al. // Astropart. Phys. 2020. 121. 102460.*
- [20] *Antonov R. et al. // Journal of Physics CS 2013. 409(1). 012088.*
- [21] *Vaiman I., Chernov D., Podgrudkov D., Bonvech E., Galkin V. et al. A drone-borne installation for studying the composition of cosmic rays in the range of 1-1000 PeV by registering the reflected Cherenkov light of EAS. Proceedings of Science. Sissa Medialab (Italy). 395, 2021.*

Calculation of optical distortions and their approximation for the SPHERA-3 telescope

C. G. Azra^a, V. I. Galkin^b

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

E-mail: ^aclemenceanastasia@gmail.com, ^bv_i_galkin@mail.ru

The optical distortions of the SPHERA series of telescopes have been studied. A spherical mirror creates on the mosaic of the telescope an image which is distorted, compared to the shape of the portrayed object. The farther from the axis of the mirror the object is, the greater the distortion becomes. In fact, there is a compression of the image space in the radial direction. These

distortions prevent further processing of the EAS images registered by the PMT mosaic of the telescope. It becomes necessary to compensate for these distortions of the images in order to bring their shape closer to the shape of the objects that are being depicted, in our case — the spots of Cherenkov light on snow from EASs.

PACS: 96.50.sb, 96.50.sd.

Keywords: extensive air showers, Cherenkov light, Monte Carlo simulation, approximation.

Received 17 May 2022.

Сведения об авторах

1. Азра Клеманс Жоржевна — студент, тел.: (495) 939-36-06, e-mail: clemenceanastasia@gmail.com.
 2. Галкин Владимир Игоревич — доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор; тел.: (495) 939-36-06, e-mail: v_i_galkin@mail.ru.
-