

## ПРОЕКТ СФЕРА-3 ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СОСТАВА ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ОБЛАСТИ 1–1000 ПэВ

© 2022 г. Д. В. Чернов<sup>1)\*</sup>, К. Ж. Азра<sup>2)</sup>, Е. А. Бонвеч<sup>1)</sup>, В. И. Галкин<sup>1),2)</sup>, В. А. Иванов<sup>2)</sup>, В. С. Латыпова<sup>2)</sup>, Д. А. Подгрудков<sup>1),2)</sup>, Т. М. Роганова<sup>1)</sup>

Поступила в редакцию 19.07.2022 г.; после доработки 19.07.2022 г.; принята к публикации 21.07.2022 г.

Определение состава первичных космических лучей в области 1–1000 ПэВ является важным направлением в изучении процессов возникновения и распространения космических лучей. На основе опыта эксплуатации аэростатной установки СФЕРА-2 разрабатывается установка СФЕРА-3 с большей светосилой и лучшим оптическим разрешением. В данной работе представлен текущий статус работ по разработке конструкции установки.

DOI: 10.31857/S0044002722060058

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время появились указания на то, что значительная часть ядер первичных космических лучей (ПКЛ) с энергией от 1 до 1000 ПэВ может иметь экстрагалактическое происхождение [1]. Исследование состава ПКЛ при этих энергиях может иметь решающее значение при выборе модели перехода от галактических космических лучей к экстрагалактическим, что, в свою очередь, важно для построения глобальной картины ускорения и распространения космических лучей. Проблема массового состава первичных космических лучей сверхвысоких энергий с энергиями выше 1 ПэВ в настоящее время далека от окончательного решения [2–4]. Экспериментальной группе KASCADE-Grande удалось выделить спектры двух групп ядер [5], более детальной классификации мешает неопределенность модели сильного взаимодействия. Несмотря на несколько десятилетий исследований по измерению состава ПКЛ прямыми методами по компонентам широких атмосферных ливней (ШАЛ), несмотря на десятки проведенных экспериментов, парциальные спектры групп ядер до сих пор не измерены при энергиях выше 1 ПэВ. Более того, результаты различных экспериментов по среднему логарифму массового числа в области энергий 3–50 ПэВ различаются

в несколько раз [4–8]. Попытка создания глобальной модели парциальных спектров в широком диапазоне первичных энергий [9] упирается в отсутствие опубликованной оценки систематических ошибок у некоторых экспериментальных групп и страдает от неопределенностей модели ядерных взаимодействий, поэтому может восприниматься только как стимул для продолжения исследования. Между тем хорошее знание парциальных спектров групп ядер необходимо для тестирования различных моделей ускорения и распространения ПКЛ. Поэтому проведение новых экспериментов, чувствительных к ядерному составу космических лучей, является важной задачей современной астрофизики.

### 2. МЕТОД ОТРАЖЕННОГО ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕТА

Проект СФЕРА направлен на решение задачи определения ядерного состава ПКЛ предложенным академиком А.Е. Чудаковым методом [10] регистрации оптического излучения Вавилова–Черенкова, чаще называемого “черенковским светом”, широких атмосферных ливней, отраженного от снежной поверхности земли.

Этот метод обеспечивает значительную площадь регистрации черенковского света с помощью компактного устройства, поднимаемого над снежной поверхностью. Черенковская компонента ШАЛ полагается наименее зависимой от модели взаимодействия, т.е. метод, основанный на ее регистрации, позволяет получить наиболее точную оценку энергии. Также изменение высоты подъема детектора позволяет измерять один и тот же диапазон энергии ПКЛ с различным разрешением, так

<sup>1)</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия.

<sup>2)</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия.

\*E-mail: chr@dec1.sinp.msu.ru

как меняется расстояние между центрами полей зрения соседних чувствительных элементов. Это, в свою очередь, позволяет контролировать величину систематических ошибок, которые могут возникать при разработке процедуры восстановления первичных характеристик ПКЛ. Поле зрения каждого чувствительного элемента детектора (пикселя) охватывает заметную часть обзораемой области. С учетом частичного перекрытия полей зрения соседних пикселей это позволяет наблюдать черенковский свет ШАЛ вблизи оси ливня в большей части событий, что обычно недоступно для наземных детекторов, расположенных на большом расстоянии друг от друга. Это обстоятельство значительно повышает точность оценки типа первичных частиц, так как интенсивность черенковского света в приосевой области чувствительна к вариациям каскада ШАЛ от разных типов ядер ПКЛ [11, 12].

Высокая точность оценки химического состава опирается на анализ каждой индивидуальной функции распределения черенковского света ШАЛ. Применение как одно-, так и многопараметрических критериев массы [13] позволяет оценить массу первичной частицы в индивидуальном событии, а не через анализ усредненного по большому числу “типичных” событий параметра (например,  $X_{\max}$ ). Хорошая методическая чистота как при определении энергии частиц ПКЛ, так и при оценке химического состава достигается благодаря тому, что алгоритмы этих процедур изолированы друг от друга.

Этот метод регистрации отраженного черенковского света ШАЛ был успешно реализован в аэростатном эксперименте с установкой СФЕРА-2 в период 2008–2013 гг. [13–19]. Установка СФЕРА-2 [15] была создана в НИИЯФ МГУ при поддержке ФИАН и ИЯИ РАН. Основной частью установки является сферическое зеркало диаметром 1.5 м с мозаикой из 109 фотоумножителей ФЭУ-84-3 в фокусе зеркала, а также 109-канальная электроника, производящая оцифровку анодного сигнала ФЭУ с шагом 12.5 нс. Угол обзора установки составлял 0.75 ср. Установка поднималась на привязном аэростате в безлунные и безоблачные зимние ночи на высоту от 300 до 900 м над поверхностью озера Байкал и регистрировала черенковский свет ШАЛ, отраженный от снежного покрова озера. По результатам измерений был получен энергетический спектр ПКЛ и проведена оценка доли легкой компоненты космических лучей, результаты опубликованы [14].

### 3. РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА СОЗДАНИЯ УСТАНОВКИ СФЕРА-3

В настоящее время разрабатывается новая установка СФЕРА-3 для регистрации отраженного

черенковского света. От предыдущей версии она будет отличаться большей светосилой, пространственным разрешением и высокой эффективностью работы. В качестве светоприемников будут использованы современные кремниевые фотоумножители (SiPM) со светосборниками.

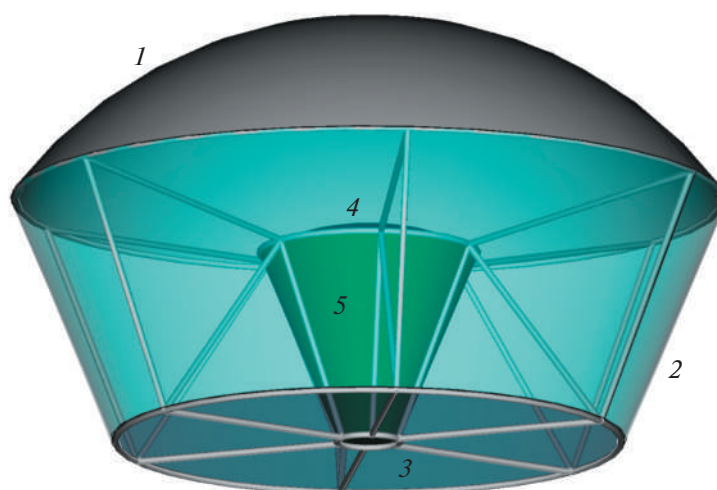
Для подъема новой установки над снежной поверхностью планируется использовать беспилотный летательный аппарат, например, воздушный грузовик вертикального взлета “Аладдин” (АЛ-1) с гибридным двигателем с возможностью работать от аккумуляторов и/или бензинового генератора. Грузоподъемность подобного БПЛА составляет до 250 кг, при габаритах 1–3 м, время полета предполагается до 4 ч. Аэродинамическая схема аппарата (12 винтомоторных групп) призвана обеспечить высокую грузоподъемность при малых габаритах и высокую отказоустойчивость: даже при выходе из строя до четырех винтомоторных групп аппарат можно безаварийно посадить, а до двух — продолжить полет.

Ниже представлены некоторые результаты разработки и моделирования элементов конструкции установки и процесса регистрации света.

#### 3.1. Конструкция детектора

В установке СФЕРА-3 используется модифицированная оптическая система Шмидта с линзовым корректором сферической аберрации. На рис. 1 показана предварительная версия конструкции рамы из алюминиевых трубок диаметром 20 мм, которая соединяет все элементы оптической системы: зеркало (1), бленду (2), отсекающую боковые блики, линзу корректора сферической аберрации (3) и мозаику кремниевых фотоумножителей (4). В затененной мозаикой области в виде усеченного конуса (5) располагается измерительная аппаратура. Такое расположение электроники позволяет существенно упростить конструкцию и уменьшить длину кабелей. Отвод тепла от электронных плат осуществляется через отверстие в нижней части.

Характеристики детектора СФЕРА-3 приведены в табл. 1. Планируется, что детектор СФЕРА-3 будет иметь эффективную площадь входного окна диафрагмы (с вычетом площади затенения от фотоприемника) не менее 1 м<sup>2</sup>, оптическое разрешение — не хуже 2000 пикселей. Поле зрения установки должно быть не менее  $\pm 20^\circ$ . Окончательные характеристики будут определены после оптимизации параметров оптической системы и моделирования.



**Рис. 1.** Предварительная версия конструкции детектора. 1 — зеркало, 2 — бленда, 3 — линзовый корректор, 4 — мозаика SiPM, 5 — место для измерительной электроники.

### 3.2. Конструкция оптики

В качестве предварительного варианта оптической конструкции детектора рассматривается несколько измененная оптическая схема Шмидта — асферическое зеркало с пластиной-корректором (см. рис. 2а). Зеркало близко к сферическому, отклонение от сферы радиуса 1654 мм составляет менее 25 мм. Внешний диаметр зеркала 2200 мм. Входное окно телескопа закрыто пластиной-корректором из акрила толщиной от 5 до 30 мм и диаметром 1700 мм. Сам корректор имеет внешнюю плоскую поверхность и внутреннюю криволинейную. Выбор такой ориентации корректора обусловлен соображениями простоты проверки сохранности геометрии телескопа при транспортировке и в процессе измерений. Между зеркалом и корректором располагается светочувствительная часть детектора — мозаика SiPM с диаметром чувствительной части 660 мм и полным

диаметром 680 мм, а также блок электроники. С учетом затенения мозаикой и блоком электроники эффективная площадь входного окна составляет  $1.9 \text{ м}^2$ .

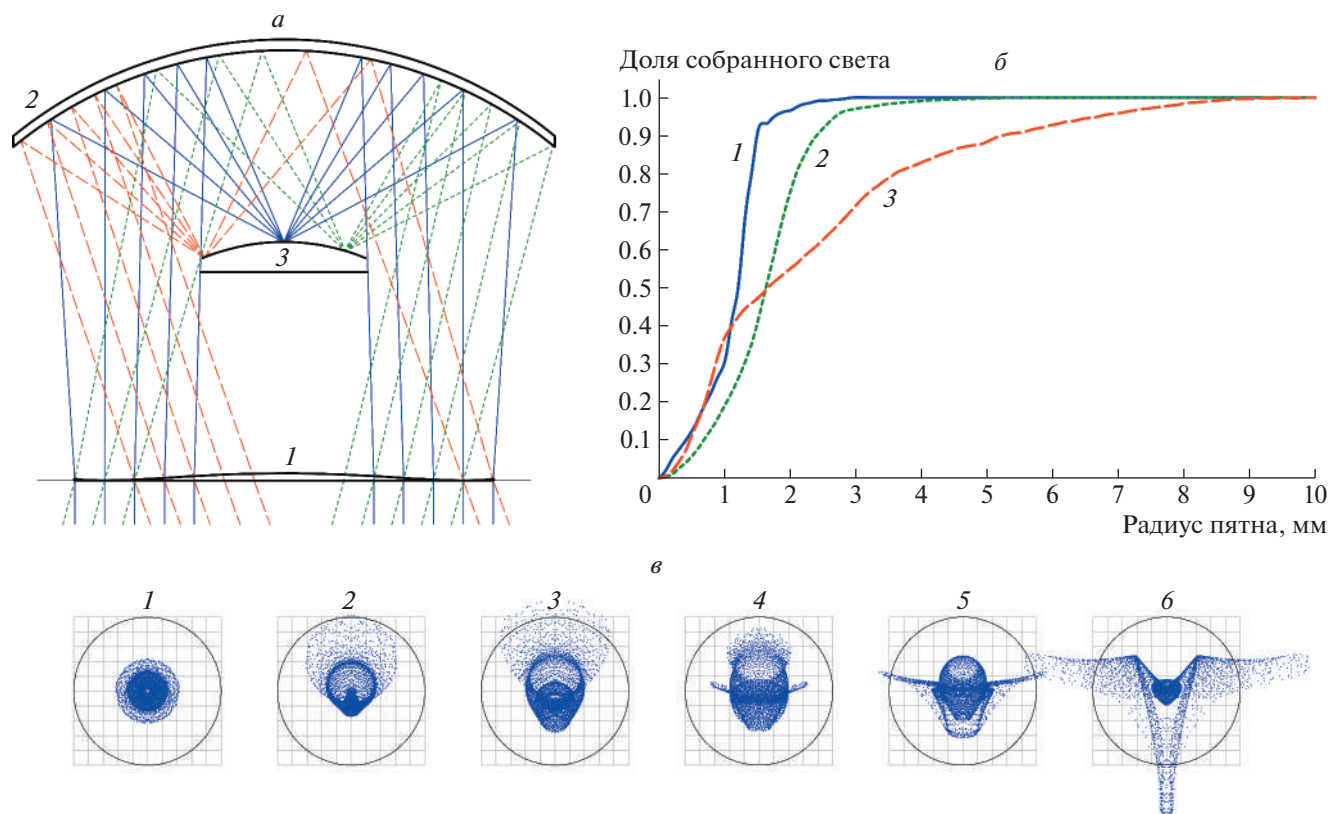
На рис. 2б показана доля собранного света внутри определенного радиуса в пятне. Видно, что для углов до  $15^\circ$  весь свет собирается в небольшое пятно радиусом до 5 мм. Эффективный радиус пикселя составляет 5.6 мм за счет светосборника, о котором пойдет речь в следующем разделе. Для углов, приближающихся к  $20^\circ$ , вокруг пятна появляется широкий ореол неправильной формы. Но и для угла  $20^\circ$  более 90% света будет собираться в один пиксель. На рис. 2в показаны пятна сведения параллельных пучков света, падающих на внешнее окно телескопа под различными углами (от  $0^\circ$  до  $20^\circ$ ). Стоит заметить, что приведенные на рисунке формы пятен рассчитаны для сферической поверхности мозаики без учета формы светосборников. Для полного анализа работы детектора требуется учесть работу светосборников и вместе с ними рассмотреть картину угловой чувствительности детектора.

**Таблица 1.** Предварительные характеристики детектора СФЕРА-3

Параметр	Значение
Чувствительная площадь оптики (входное окно диафрагмы), $\text{м}^2$	$>1$
Диаметр зеркала, мм	до 2200
Угол обзора оптической системы, град	$\pm 25$
Количество элементов мозаики (кремниевые фотоумножители)	2000–3000
Масса детектора, кг	100
Максимальная высота подъема детектора, м	2000

### 3.3. Исследование линзовых светосборников

Для повышения чувствительности детектора предполагается использовать светосборники. Это, с одной стороны, позволит уменьшить количество измерительных каналов и энергопотребление детектора, а, с другой стороны, увеличить количество фотонов, попадающих в пиксель, т.е. понизить порог регистрации. Конструкция детектора (см. рис. 2а) предполагает, что свет на поверхность кремниевого фотоумножителя приходит под заметными, до  $60^\circ$ , углами к поверхности SiPM. Наибольшее количество света приходит под углами



**Рис. 2.** *а* — Оптическая схема детектора (1 — корректор, 2 — зеркало, 3 — мозаика SiPM) с ходом лучей, падающих нормально на входное окно (сплошные линии), под углом 15° (штриховые) и 20° (точечные). *б* — Доля света, собранного в круге переменного радиуса вокруг центра светового пятна для разных углов прихода лучей на входное окно: 1 — 0°, 2 — 15°, 3 — 20°. *в* — Форма светового пятна для различных углов падения на входное окно параллельных пучков света: 1 — 0°, 2 — 4°, 3 — 8°, 4 — 12°, 5 — 16°, 6 — 20°, сетка с шагом 1 мм, окружностью показан примерный размер пикселя с диаметром 10 мм.

30°–40°. В этом случае применение обычных конусных светосборников неэффективно. Обеспечить большой угол сбора света способны линзовые светосборники.

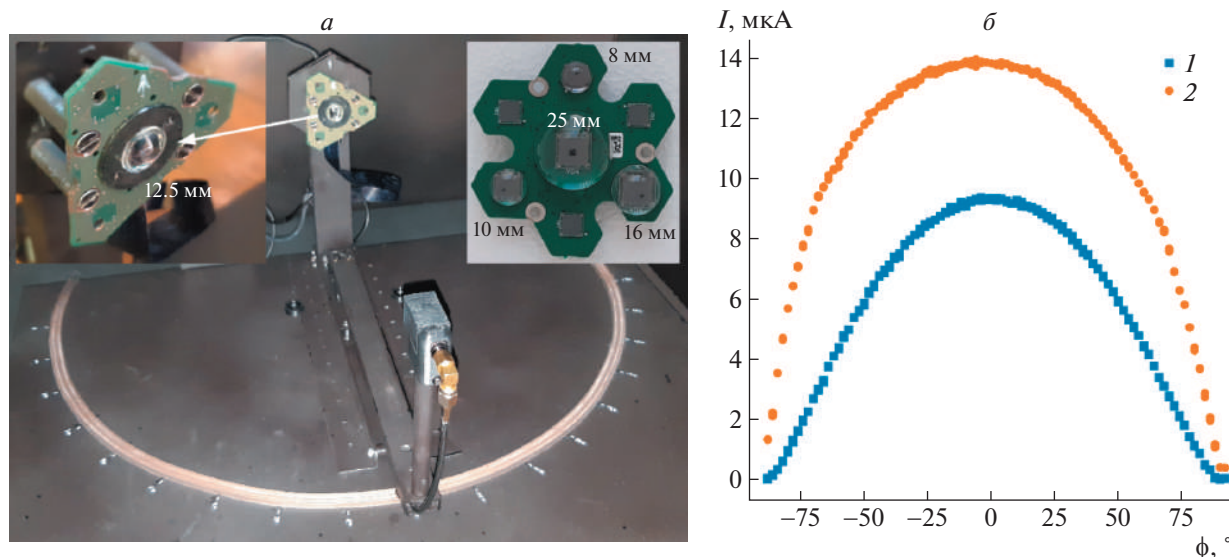
Исследовались несколько готовых линз разного диаметра и радиуса кривизны, испытательный стенд и часть исследованных образцов показаны на рис. 3а. Светосборник устанавливался на оптический контакт с SiPM и освещался источником света — светодиодом с длиной волны 405 нм. Угловой размер источника света для приемника составлял около 1°, а шаг движения кулисы с источником в горизонтальной плоскости 2°. Измерения повторялись несколько раз при повороте SiPM в вертикальной плоскости на 10°, 30° и 45°. Интенсивность постоянного светового потока на поверхности SiPM измерялась по величине постоянного тока через SiPM. На рис. 3б приведены результаты измерений с готовыми сферическими линзами диаметром 12.5 мм с радиусом кривизны 8 мм, которые показали увеличение светосбора в 2.5 раза для углов 60° от оптической оси по сравнению с

SiPM без светосборников. Для достижения максимальной собирающей способности планируется разработать светосборники специальной формы.

### 3.4. Модель отклика SiPM

Для моделирования характеристик электроники измерительной системы нового детектора создана модель отклика планируемого к использованию в установке СФЕРА-3 кремниевого фотоумножителя SiPM SensL MicroFC-60035. Проведено моделирование отклика SiPM на однофотонное событие.

Кремниевый фотоумножитель может быть представлен в виде схемы, состоящей из большого количества однофотонных лавинных фотодиодов (SPAD), соединенных параллельно. Для моделирования работы SiPM используется упрощенная схема однофотонных лавинных фотодиодов, на схеме на рис. 4 она обозначена как активная ячейка. Эквивалентная схема однофотонных лавинных фотодиодов представляет собой параллельное соединение внутреннего резистора области



**Рис. 3.** Исследование линзовых светосборников. *а* — Стенд для автоматического измерения угловых характеристик чувствительности SiPM и светосборников. Линзы разной формы и размеров устанавливаются на SiPM на оптическом контакте. *б* — Результаты измерений чувствительности SiPM в зависимости от угла падения света на его поверхность: SiPM без светосборника (1), SiPM со светосборником диаметром 12.5 мм и радиусом кривизны 8 мм (2).

пространственного заряда диода и внутреннего конденсатора обедненного слоя. Схема гашения содержит резистор гашения  $R3$  и конденсатор  $C1$ , имитирующий паразитные емкости. Для имитации прихода фотона используются ключ и источник напряжения в ветви с сопротивлением  $R2$  [20]. С источника импульсного тока  $V2$  на клеммы электрического ключа  $S1$  подается сигнал, длительность которого соответствует времени лавинного процесса. Замыкание ключа приводит к разрядке конденсатора  $C1$ , которая провоцирует экспоненциальное падение напряжения на узле между  $C2$  и  $C1$ . Максимальное падение напряжения на узле контролируется внутренним источником напряжения  $V3$  и зависит от температуры работы SiPM.

В кремниевом фотоумножителе MicroFC-60035 18 980 ячеек. В нашем рассмотрении считается, что ячейки способны поглощать фотоны независимо друг от друга, что позволяет разделить ячейки на две категории для упрощения моделирования:

1. Активная ячейка, на которой произошло поглощение фотона. Ключ замкнут.
2. Пассивная ячейка, на которой поглощения фотона не произошло. Ключ разомкнут.

Данная схема имеет потенциал к масштабированию количества активных элементов, а также к адаптации для моделирования работы других серий SiPM с иным числом ячеек.

Номиналы элементов были подобраны таким образом, чтобы сигнал на быстром выходе SiPM

соответствовал экспериментальной кривой из документации производителя [21]. Полученные оценки значений номиналов компонент приведены в табл. 2.

Сплошная линия на графике на рис. 5 соответствует рассчитанному отклику модели на быстром выходе SiPM, точками показаны оцифрованные экспериментальные данные производителя SiPM. Для совпадения полученной кривой формы импульса на выходе SiPM с данными производителя модель была дополнена конденсатором быстрого выхода  $Cx$ , учитывающим паразитную емкость кабеля, соединяющего детектор с осциллографом.

Имея модель кремниевого фотоумножителя, можно определить характеристики измерительной аппаратуры.

**Таблица 2.** Номиналы компонент, использованных на схеме на рис. 4

	Номинал		Номинал		Номинал
$R1$	0.01 Ом	$C1$	0.18 пФ	$V1$	27 В
$R2$	392 кОм	$C2$	0.55 фФ	$V2$	Генератор 1.75 нс
$R3$	4.15 кОм	$C3$	2.52 фФ	$V3$	24.5 В
$R4$	0.01 Ом	$C4$	48 пФ		
$R5$	20.63 Ом	$C5$	3400 пФ		
$R6$	50 Ом	$C6$	10.45 пФ		



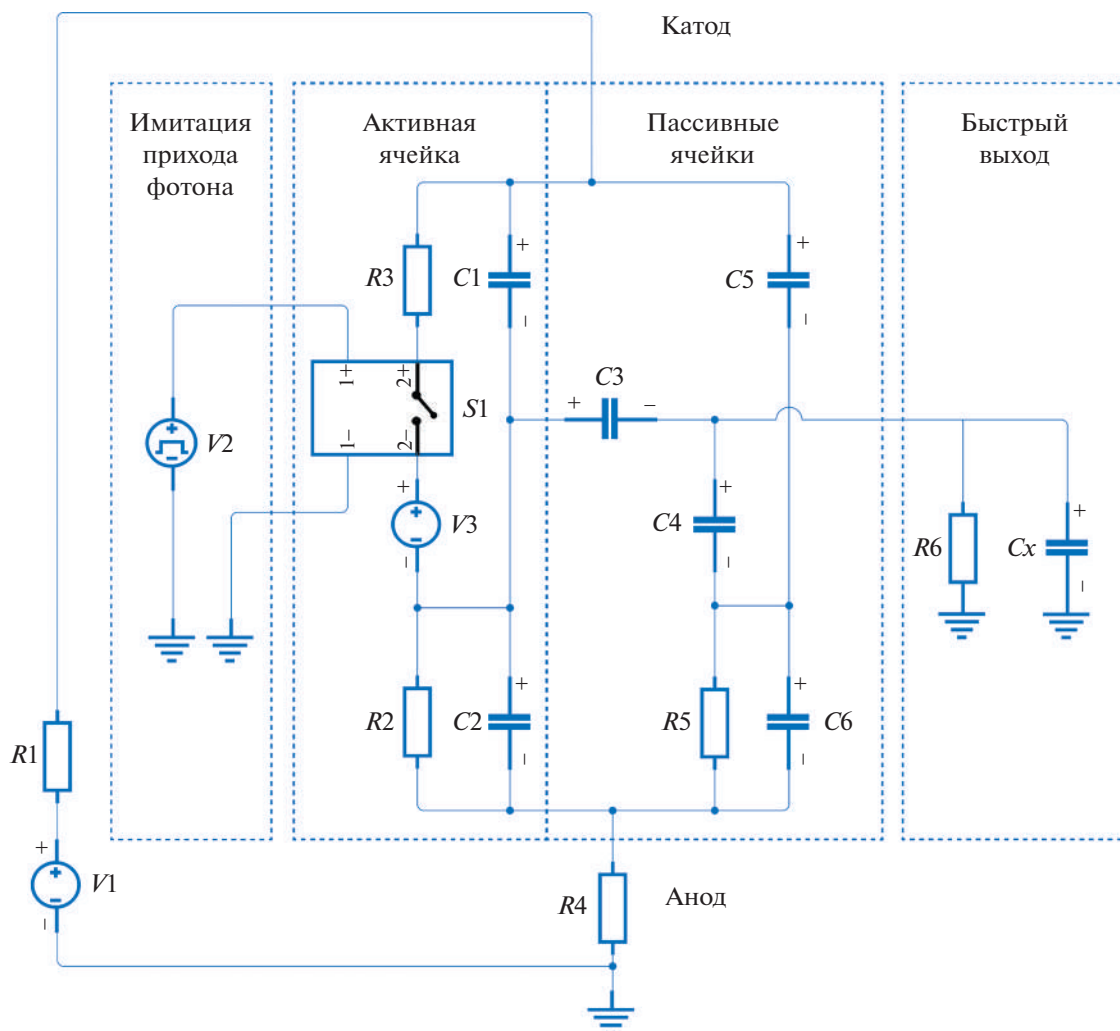


Рис. 4. Функциональная схема модели устройства SiPM.

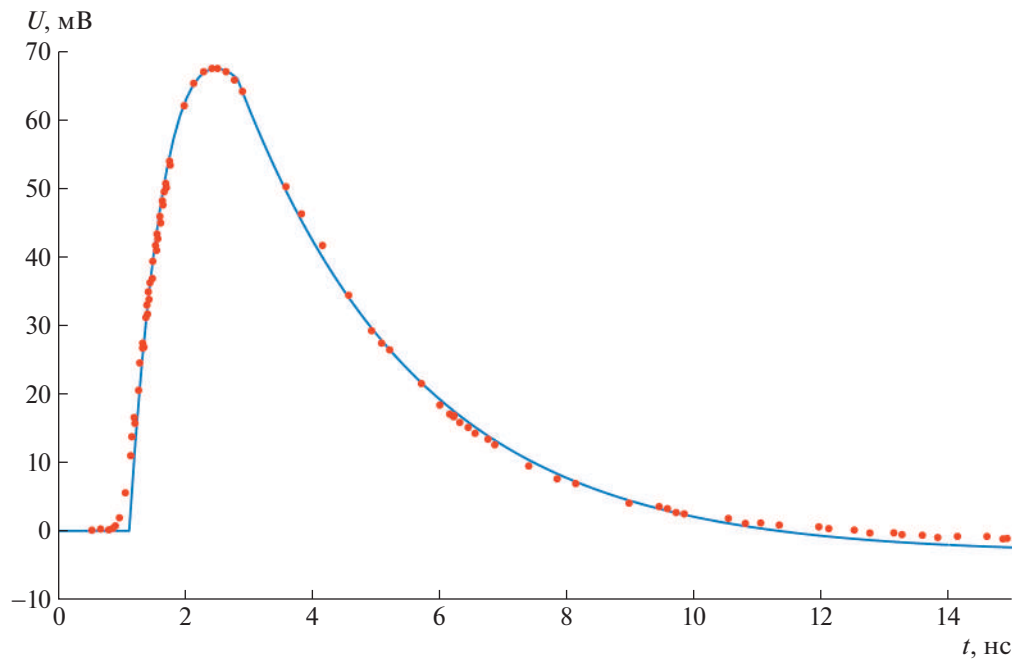
### 3.5. Измерительная аппаратура

Основным элементом детектора черенковского света новой установки является сегмент из нескольких SiPM. Похожий сегмент из семи SiPM был разработан нами ранее [22], он приведен на рис. 3а. Испытание матрицы из семи таких сегментов с 49 SiPM было завершено в 2018 г., а с сентября 2019 г. матрица успешно эксплуатируется в составе телескопа SIT комплексной установки TAIGA [23, 24]. В новом детекторе планируется доработать и адаптировать сегмент SiPM для использования в оптической системе с линзовыми светосборниками.

Для регистрации усиленных аналоговых сигналов, получаемых от SiPM, разрабатывается плата оцифровки на базе микросхемы восьмиканального быстрого аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Частота оцифровки от 80 до 100 МГц и амплитудное разрешение от 12 до 14 бит обеспечивают динамический диапазон до  $10^4$ . Благодаря

малым размерам микросхемы АЦП ( $9 \times 9$  мм) измерительная плата может быть установлена недалеко от плат сегментов SiPM непосредственно под мозаикой, см. рис. 1. Такая компоновка позволяет значительно сократить массу и габариты детектора. Оцифрованные сигналы с каждого канала в последовательном коде передаются по интерфейсу LVDS на микросхему программируемой логики. Вся внутренняя логика работы измерительной системы и локального триггера для отбора событий загружается в микросхему в виде файла конфигурации. Результаты измерений сохраняются на карту памяти microSD встроенного компьютера каждой измерительной платы для последующей кластеризации и обработки.

Оцифровка сигналов ведется непрерывно, однако сохранять поток данных до 500 Гб/с технически почти невозможно и на практике не требуется. Для выделения полезных событий из потока данных разрабатывается триггерная плата. Плата



**Рис. 5.** Импульс на выходе SiPM. Напряжение  $U$  на быстром выходе в зависимости от времени  $t$ . Сплошная кривая — отклик модели, точки — экспериментальные данные изготовителя [22].

получает сигналы от цифровых амплитудных дискриминаторов с каждого измерительного канала. При обнаружении срабатывания дискриминаторов в трех или более соседних каналах в течение 1 мкс плата передает сигнал подтверждения на все измерительные платы, которые, в свою очередь, перемещают из оперативной памяти в постоянную данные за 10–20 мкс до и после прихода сигнала подтверждения триггера. Объем одного такого события вместе с калибровочными данными составит около 25 Мб. Ожидается, что максимальная частота срабатывания триггера не будет превышать 1 Гц. Для выбора оптимального алгоритма работы системы выделения полезных сигналов из фона (выработка триггерного сигнала) разрабатывается математическая модель на основе банка модельных событий.

#### 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ

##### 4.1. Аппроксимация пространственного распределения черенковского света ШАЛ

Одной из задач экспериментов СФЕРА является оценка массы первичной частицы. Используемый в эксперименте СФЕРА критерий оценки массы [25] основан на измеряемой форме пространственного распределения черенковского света ШАЛ и определяется как отношение интегралов полного числа черенковских фотонов в кольцах с различными радиусами. При использовании такого критерия первичной массы область вблизи оси

ливня несет важную информацию о массе первичной частицы, поэтому используемая функция должна хорошо аппроксимировать характеристики ШАЛ в области от 0 до 300 м.

Для целей моделирования установки типа СФЕРА распределение  $I(R)$  черенковского света ШАЛ на поверхности земли аппроксимируется с помощью функции вида (1):

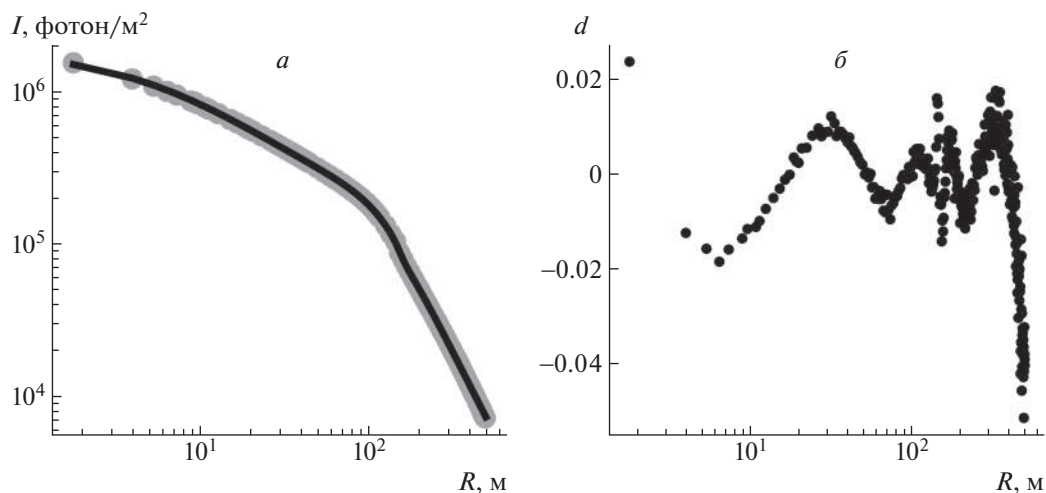
$$F = \frac{p_0}{(1 + p_1 R + p_2 R^2 + p_3 R^3)} w_1 + \frac{p_4}{(1 + p_5 R + p_6 R^2)} w_2, \quad (1)$$

$$w_1 = \frac{1}{(1 + \exp((R - R_{\text{ch}})/s))}, \quad (2)$$

$$w_2 = \frac{1}{(1 + \exp(-(R - R_{\text{ch}})/s))},$$

где  $R$  — расстояние от оси ливня,  $p_1, \dots, p_6, R_{\text{ch}}$  — подбираемые параметры.

Функция аппроксимации  $F$  пространственного распределения черенковского света ШАЛ (рис. 6а) отклоняется от модели  $I(R)$  менее чем на 10% в диапазоне расстояний 0–500 м от оси ливня (рис. 6б), а в области от 0 до 100 м относительная погрешность  $d = (I(R) - F(p_1, \dots, p_6, R_{\text{ch}}, R))/I(R)$  в большинстве случаев не превышает 2% и увеличивается с увеличением расстояния от оси. Такая точность функции аппроксимации пространственного распределения



**Рис. 6.** *а* — Функция пространственного распределения черенковского света ШАЛ, усредненная по азимутальному углу, для индивидуального события ШАЛ. Серым отмечены точки моделирования  $I(R)$ , кривой обозначена аппроксимирующая функция  $F$  по формуле (1). *б* — Относительное отклонение аппроксимирующей кривой  $F$  от смоделированных точек.

черенковского света ШАЛ подходит для использования критерия первичной массы. Подробности моделирования, проведенного для поиска данной аппроксимации, изложены в [26]. Аппроксимация (1) изначально предназначалась для обработки событий эксперимента СФЕРА-2, но она может быть применена для любого эксперимента, который использует функцию пространственного распределения черенковского света ШАЛ на уровне поверхности земли.

#### 4.2. Учет искажений зеркала

Сферическое зеркало создает на мозаике детектора изображение искаженной формы по сравнению с формой изображаемого объекта. Анализ черенковских образов ШАЛ в поле зрения телескопов типа СФЕРА для решения задачи оценки массы первичных частиц требует учета этих искажений, поскольку при обработке образы аппроксимируются аксиально-симметричной функцией. Построен алгоритм расчета функций, корректирующих искажения сферического зеркала.

Расчет проведен для следующей упрощенной конфигурации оптической системы: 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. Детектор осматривает снежную поверхность под собой с высоты 1000 м.

Рассматривалась последовательность точечных объектов на снегу, удаляющихся от оси телескопа с постоянным шагом, и последовательность центров тяжести облаков их изображений на мозаике. Расстояния от оси телескопа до точек на снегу обозначим через  $r$ , а расстояния от центра мозаики до изображений этих точек через  $\rho$ .

На рис. 7*а* штриховой линией приведено расстояние  $\rho$  от центра мозаики до изображения в зависимости от расстояния  $r$  от оси телескопа до точки на снегу, полученное путем моделирования хода лучей в оптической системе. Зависимость нелинейна, т.е. проекции расстояния на снегу  $r$  на мозаику сжимаются к краю мозаики. На оси ( $r = 0$ ) искажений изображения нет, и мы можем провести линейную зависимость (сплошная прямая на рис. 7*а*) исправленного расстояния  $\rho'$  от оси до изображения как касательную к кривой в точке  $r = 0$ .

Стоит отметить, что сферические искажения приводят также к изменению количества света, собираемого формально одинаковыми по площади фотосенсорами, расположенными на разном расстоянии от центра мозаики. Элемент площади фотосенсора записывается в полярной системе координат  $(\rho, \varphi)$ :  $dS = \rho d\rho d\varphi$ , где  $\rho$  — расстояние до элемента площади на мозаике. Поскольку искажение зависит только от радиуса, в исправленной системе координат элемент площади  $dS' = \rho' d\rho' d\varphi$ . На рис. 7*б* представлена связь исправленного линейаризованного расстояния  $\rho'$  и исходного искаженного расстояния  $\rho$  на мозаике, полученная из отношения кривой и прямой на рис. 7*а*. Исправленное расстояние  $\rho'$  превосходит исходное  $\rho$ , следовательно, элемент площади после коррекции  $dS'$



больше, т.е. искажения сферического зеркала приводят к сжатию светового потока. Таким образом, фотосенсор с центром на расстоянии  $\rho$  от оси имеет эффективную площадь больше в

$$\zeta(\rho) = \frac{dS'}{dS} = \frac{\rho' d\rho'}{\rho d\rho}. \quad (3)$$

Тогда для коррекции изображения число фотонов в нем надо уменьшить в  $\zeta(\rho)$  раз, функция  $\zeta(\rho)$  приведена на рис. 8а.

Если снежная поверхность освещена равномерно, то освещенность мозаики увеличивается к краям. Это увеличение определяется геометрией оптической схемы и должно учитываться как еще одно искажение сферического зеркала. Итоговая зависимость относительной освещенности  $\delta(\rho)$ , нормированная на максимальное значение, представлена на рис. 8б. Подробности расчета можно найти в статье [27].

#### 4.3. Разделение первичных частиц по массе для ливней, близких к вертикальным

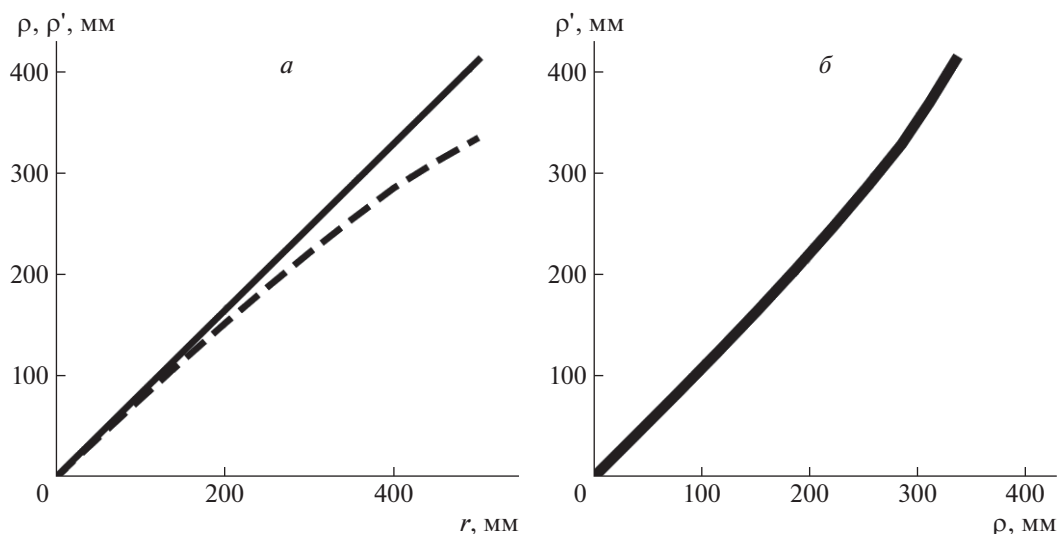
Важной особенностью телескопа СФЕРА-2 является способность видеть пятно черенковского света от ШАЛ на снегу с пространственным разрешением 30–80 м в зависимости от высоты наблюдения. Просматриваемая часть полной площади пятна черенковского света ШАЛ составляет около 30%. Особенно важна возможность наблюдать область пятна вблизи оси ливня радиусом около 150 м, несущую ценную информацию о массе первичной частицы. У проектируемого телескопа СФЕРА-3 число пикселей мозаики будет существенно больше, а размещены они будут плотнее, что увеличит пространственное разрешение телескопа и долю наблюдаемой площади пятна. Конструкцию телескопа и алгоритмы обработки образов предполагается оптимизировать именно относительно задачи разделения событий по первичной массе.

Первые критериальные параметры, основанные на непосредственных измерениях и чувствительные к первичной массе, были найдены еще до начала работы телескопа СФЕРА-2 [25]. Эти параметры использовали характерное поведение пространственного распределения черенковского света ШАЛ: в среднем, крутизна распределения в приосевой области уменьшается с ростом массы первичного ядра при одной и той же первичной энергии. Главная проблема разделения ливней по первичной массе состоит в наличии каскадных флуктуаций, приводящих к существенным отклонениям крутизны от средних значений.

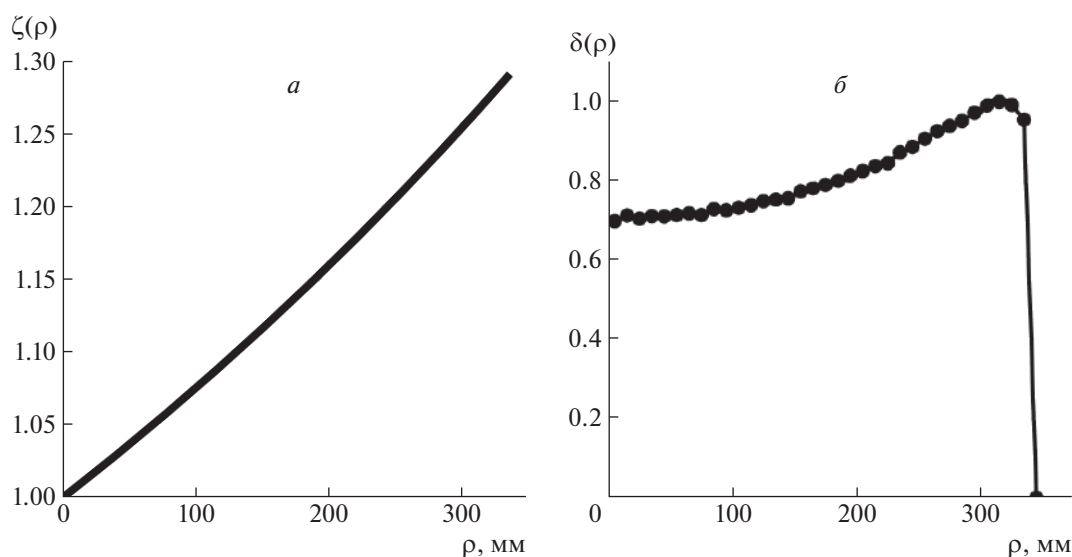
Хороший критериальный параметр позволяет оценивать первичную массу с минимальной ошибкой для заданных условий эксперимента (конструкции детектора, геометрии измерений, уровня фона и т.п.). Для этого он должен удовлетворять следующим требованиям. Во-первых, основываться на непосредственно измеряемых характеристиках ШАЛ или вычисляемых на их основании с минимальными приближениями. Во-вторых, выражаться через интегралы от измеряемых характеристик, что частично подавляет влияние флуктуаций сигнала и фона. В-третьих, основываться на показателях формы измеряемых распределений. Последнее свойство позволяет значительно снизить зависимость результирующего критерия от модели ядерного взаимодействия, которая вносит существенную неопределенность при оценке первичной массы.

Для обработки результатов эксперимента СФЕРА-2 использовался критериальный параметр, являющийся отношением интегралов от аксиально-симметричной аппроксимации поперечного распределения черенковского света ШАЛ на снежной поверхности по двум областям: кругу с центром на оси и радиусом 70 м и окружающему его кольцу с внешним радиусом 140 м [25]. На базе этого параметра удалось разделить все ядра на легкую и тяжелую компоненты. Для этого пришлось приводить поперечное распределение изображения на мозаике к поперечному распределению на снегу. В настоящее время идет работа над критериальными параметрами, основанными на форме изображения непосредственно на мозаике. Новые параметры строятся для целевых диапазонов первичных параметров СФЕРА-2, а также для диапазонов, планируемых для СФЕРА-3. Поскольку оценка первичной массы выбрана в качестве ведущей задачи нового эксперимента, сравнение результатов классификации событий по первичной массе для разных вариантов конструкции детектора позволяет эту конструкцию оптимизировать.

На базовых ядрах ( $^1\text{H}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ) ошибки классификации для детектора СФЕРА-2 составляют около 0.30 (рис. 9), причем удалось построить критерии, у которых эти ошибки практически не зависят от модели ядерного взаимодействия (были рассмотрены модели QGSJET01 и QGSJETII-04). Данные СФЕРА-2 будут переобработаны с помощью новых критериальных параметров, при этом будет реализован последовательный индивидуальный подход: для каждого события будут построены оценки всех первичных параметров. После этого деление на группы по массе можно будет проводить по-разному, в зависимости от поставленной задачи. Все улучшения методов обработки данных



**Рис. 7.** *a* — Искаженное расстояние  $\rho$  (штриховая кривая) и скорректированное расстояние  $\rho'$  (сплошная) от центра мозаики до изображения в зависимости от расстояния  $r$  от оси телескопа до точки на снегу. *б* — Функция, связывающая искаженное расстояние  $\rho$  и скорректированное расстояние  $\rho'$  на мозаике.



**Рис. 8.** *a* — Коэффициент  $\zeta(\rho)$  уменьшения числа фотонов в фотосенсоре в зависимости от расстояния  $\rho$  на мозаике; *б* — относительная яркость изображения  $\delta(\rho)$  в зависимости от расстояния от центра мозаики  $\rho$ .

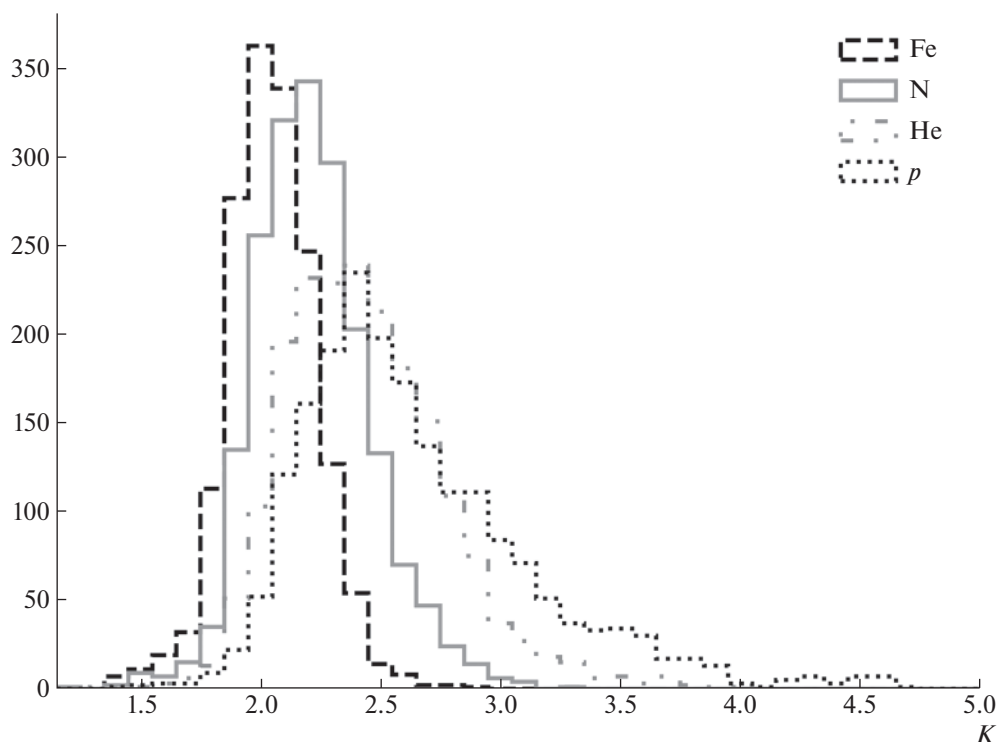
СФЕРА-2 будут распространены на соответствующие методы для СФЕРА-3.

Усовершенствование и оптимизация конструкции СФЕРА-3 позволят повысить разрешение по первичной массе за счет учета ряда факторов при обработке. Развитие методов обработки пойдет по двум направлениям. Во-первых, будут учтены искажения, вносимые зеркалом и корректором, и построена более адекватная аппроксимация изображения на мозаике телескопа. Во-вторых, на основе лучшего приближения формы изображения будут найдены оптимальные критериальные параметры, максимально чувствительные к первичной массе, в

частности, будут испробованы многомерные критерии, основанные минимум на двух признаках-показателях формы изображения. В этом случае разделение событий на заранее заданные группы ядер не является целью: процесс классификации нужен только для выбора наиболее чувствительных критериальных параметров.

## 5. ПОИСК НОВЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ВЫДЕЛЕНИЯ КОМПОНЕНТ ПКЛ

В детекторе СФЕРА-3 будет использована оптическая система Шмидта с корректирующей сфе-



**Рис. 9.** Гистограммы распределений критериальных параметров  $K$  для  $E = 10$  ПэВ, наклона  $15^\circ$ , модели атмосферы 11 из списка CORSIKA и высоты наблюдения 900 м детектора СФЕРА-2. Черенковские образы ШАЛ были аппроксимированы аксиально-симметричной функцией, отношение интегралов от которой по оптимальным областям составляет критериальный параметр.

рическую абберацию линзой. В такой системе центральная часть зеркала не задействована, так как находится в тени от фотоприемника. Эта область может быть использована для регистрации прямого черенковского света через отверстия в зеркале. Расчеты показывают, что для ШАЛ от ПКЛ с энергией 10 ПэВ поток черенковского света составляет  $\sim 150$  фотонов на  $1 \text{ см}^2$  на расстоянии 100 м от оси ливня. С учетом эффективности регистрации фотонов (PDE) SiPM  $\sim 40\%$  и при потерях на оптических элементах до 75% можно зарегистрировать  $\sim 45$  фотоэлектронов с  $1 \text{ см}^2$ . Сигналы от прямого черенковского света и отраженного регистрируются отдельно, так как приходят на детектор с разницей 3.3 нс для высоты детектора 500 м. При оценке состава ПКЛ информацию об интенсивности прямого черенковского света можно использовать в дополнение к данным об отраженном черенковском свете. ШАЛ от первичного протона должен формировать световое пятно на фотоприемнике большего углового размера, чем от ядер железа при одинаковой первичной энергии и глубине максимума развития каскада вторичных частиц [28]. Планируется проведение исследования для определения эффективности и целесообразности регистрации прямого черенковского света для достижения поставленной цели проекта.

Спектр черенковского света ШАЛ имеет широкое распределение от глубокого ультрафиолета до инфракрасного. Однако в инфракрасной области его интенсивность незначительна, а ультрафиолетовая поглощается слоем атмосферы. Тем не менее, ультрафиолетовая часть (длина волны короче 350 нм) черенковского света ШАЛ присутствует в потоке света, приходящем на поверхность Земли. Этот свет генерируется затухающим каскадом ШАЛ в нижних слоях атмосферы, где концентрация озона незначительна. При энергиях ПКЛ выше 1 ПэВ такие “затянувшиеся” каскады могут генерироваться протонами и легкими ядрами. Конечно, этот черенковский свет в ультрафиолетовом диапазоне составляет малую долю в общем потоке, но его удельная доля в приосевой области ШАЛ может быть достаточной для регистрации разрабатываемым детектором. Как правило, современные детекторы черенковского света наиболее эффективно регистрируют область 400–500 нм, где ФЭУ и SiPM имеют максимальную чувствительность. Для выделения ультрафиолетовой компоненты черенковского света в фотоприемнике планируется использовать SiPM с повышенной чувствительностью в области 250–300 нм наряду с обычными SiPM с чувствительностью от 300 нм. Располагая эти два типа SiPM в шахматном порядке, можно

дифференцировать составляющие светового потока черенковского света ШАЛ. Данная гипотеза о возможности инструментального выделения легкой компоненты ПКЛ будет исследована на основе математического моделирования.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны общие принципы устройства конструкции оптической системы установки СФЕРА-3. Идет поиск оптимальных параметров оптических элементов детектора: зеркала, корректирующей линзы, фотоприемника с SiPM и линзовыми светосборниками. Исследованы характеристики образцов готовых линзовых светосборников. Проведено моделирование отклика SiPM от однофотозлектронного события. Продолжено моделирование с целью поиска и улучшения критериев выделения событий от разных типов первичных космических лучей. Идет поиск носителя для установки СФЕРА-3.

Детектор СФЕРА-3, регистрирующий отраженный черенковский свет ШАЛ, обеспечит получение новых знаний о химическом составе ПКЛ в области энергий 1–1000 ПэВ. В частности, предполагается получить экспериментальные данные для определения парциальных спектров для нескольких групп ПКЛ (протоны, группы CNO и Fe) в области энергий 1–1000 ПэВ на основе обработки индивидуальных событий ШАЛ. Данные о составе ПКЛ в указанном диапазоне энергий будут иметь определяющее значение при выборе модели перехода от галактических космических лучей к экстрагалактическим, что, в свою очередь, важно для построения глобальной картины ускорения и распространения космических лучей во Вселенной.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. Thoudam, J. P. Rachen, A. van Vliet, A. Achterberg, S. Buitink, H. Falcke, and J. R. Hörandel, *Astron. Astrophys.* **595**, A33 (2016).
2. F. G. Schöder, *PoS (ICRC2019)* 030 (2019).
3. Pierre Auger Collab., *Phys. Lett. B* **762**, 288 (2016).
4. A. Glushko and A. Sabourov, *JETP Lett.* **98**, 655 (2013).
5. W. D. Apel, J. C. Arteaga-Velázquez, K. Bekk, M. Bertaina, J. Blümer, H. Bozdog, I. M. Brancus, E. Cantoni, A. Chiavassa, F. Cossavella, K. Daumiller, V. de Souza, F. Di Pierro, P. Doll, R. Engel, J. Engler, *et al.*, *Astropart. Phys.* **47**, 54 (2013).
6. T. Antoni, W. D. Apel, A. F. Badea, K. Bekk, A. Bercuci, J. Bümer, H. Bozdog, I. M. Brancus, A. Chilingarian, K. Daumiller, P. Doll, R. Engel, J. Engler, F. Feßler, H. J. Gils, R. Glasstetter, *et al.*, *Astropart. Phys.* **24**, 1 (2005).
7. M. G. Aartsen *et al.*, *Phys. Rev. D* **88**, 042004 (2013).
8. The IceCube Collab., *PoS (ICRC2019)* 014 (2019).
9. H. P. Dembinski, R. Engel, A. Fedynitch, T. Gaisser, F. Riehn, and T. Stanev, *PoS (ICRC2017)* 533 (2017).
10. А. Е. Чудаков, *Экспериментальные методы исследования космических лучей сверхвысоких энергий: Материалы Всесоюзного симпозиума, Якутск, 19–23 июня 1972* (Якутск. фил. Сиб. отд. АН СССР, 1974), с. 69.
11. T. C. Weekes, M. F. Cawley, D. J. Fegan, K. G. Gibbs, A. M. Hillas, P. W. Kowk, R. C. Lamb, D. A. Lewis, D. Macomb, N. A. Porter, P. T. Reynolds, and G. Vacanti, *Astrophys. J.* **342**, 379 (1989).
12. A. V. Plyasheshnikov, A. K. Konopelko, F. A. Aharonian, M. Hemberger, W. Hofmann, and H. J. Völk, *J. Phys. G.* **24**, 653 (1998).
13. R. A. Antonov, T. V. Aulova, E. A. Bonvech, D. V. Chernov, T. A. Dzhatdov, Mich. Finger, Mir. Finger, V. I. Galkin, D. A. Podgrudkov, and T. M. Roganova, *J. Phys.: Conf. Ser.* **632**, 012090 (2015).
14. Р. А. Антонов, Т. В. Аулова, Е. А. Бонвеч, В. И. Галкин, Т. А. Джатдоев, Д. А. Подгрудков, Т. М. Роганова, Д. В. Чернов, *ЭЧАЯ* **46**, 115 (2015) [*Phys. Part. Nucl.* **46**, 60 (2015)].
15. R. A. Antonov, E. A. Bonvech, D. V. Chernov, T. A. Dzhatdov, M. Finger, Jr., M. Finger, D. A. Podgrudkov, T. M. Roganova, A. V. Shirokov, and I. A. Vaiman, *Astropart. Phys.* **121**, 102460 (2020).
16. R. A. Antonov, E. A. Bonvech, D. V. Chernov, D. A. Podgrudkov, and T. M. Roganova, *Astropart. Phys.* **77**, 55 (2016).
17. E. A. Bonvech, D. V. Chernov, M. Finger, M. Finger, V. Galkin, D. Podgrudkov, T. Roganova, and I. Vaiman, *Universe* **8**, 46 (2022).
18. R. A. Antonov, S. P. Beschapov, E. A. Bonvech, D. V. Chernov, T. A. Dzhatdov, Mir. Finger, Mix. Finger, V. I. Galkin, N. V. Kabanova, A. S. Petkun, D. A. Podgrudkov, T. M. Roganova, S. B. Shaulov, and T. I. Sysoeva, *J. Phys.: Conf. Ser.* **409**, 012088 (2013).
19. R. A. Antonov, T. V. Aulova, S. P. Beschapov, E. A. Bonvech, D. V. Chernov, T. A. Dzhatdov, Mir. Finger, Mix. Finger, V. I. Galkin, N. V. Kabanova, A. S. Petkun, D. A. Podgrudkov, T. M. Roganova, S. B. Shaulov, and T. I. Sysoeva, in *Proceedings of the 33rd International Cosmic Ray Conference, Rio de Janeiro, 2014*, p. 1185.
20. S. Gundacker and A. Heering, *Phys. Med. Biol.* **65**, 17 (2020).
21. Silicon Photomultipliers (SiPM), Low-Noise, Blue-Sensitive C-Series SiPM Sensors (SensL Inc, July, 2014), Rev. 1.0.
22. D. Chernov, E. Bonvech, T. Dzhatdov, Mir. Finger, Mich. Finger, V. Galkin, G. Garipov, V. Kozhin, D. Podgrudkov, and A. Skurikhin, *J. Phys.: Conf. Ser.* **1181**, 012025 (2019).
23. D. Chernov, I. Astapov, P. Bezyazeev, E. Bonvech, A. Borodin, M. Brueckner, N. Budnev, D. Chernukh, A. Chiavassa, A. Dyachok, O. Fedorov, A. Gafarov, A. Garmash, V. Grebenyuk, O. Gress, T. Gress, *et al.*, *JINST* **15**, C09062 (2020).

24. Д. А. Подгрудков, Е. А. Бонвеч, И. А. Вайман, Д. В. Чернов, И. И. Астапов, П. А. Безъязыков, М. Бланк, А. Н. Бородин, М. Брюкнер, Н. М. Буднев, А. В. Булан, А. Вайдянатан, Р. Вишневский, П. А. Волчугов, Д. М. Воронин, А. Р. Гафаров и др., Изв. РАН. Сер. физ. **85**, 541 (2021) [Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. **85**, 408 (2021)].
25. В. И. Галкин, Т. А. Джатдоев, Изв. РАН. Сер. физ. **75**, 338 (2011) [Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. **75**, 309 (2011)].
26. В. С. Латыпова, В. И. Галкин, Ученые записки физ. фак-та Моск. ун-та (2022) (принята к печати под номером m13667).
27. К. Ж. Азра, В. И. Галкин, Ученые записки физ. фак-та Моск. ун-та (2022) (принята к печати под номером m13619).
28. R. Bakhromzod and V. I. Galkin, Nucl. Instrum. Methods A **1018**, 165842 (2021).

## SPHERE-3 PROJECT FOR PRIMARY COSMIC RAYS COMPOSITION STUDY IN 1–1000 PeV RANGE

**D. V. Chernov<sup>1)</sup>, C. Azra<sup>2)</sup>, E. A. Bonvech<sup>1)</sup>, V. I. Galkin<sup>1),2)</sup>, V. A. Ivanov<sup>2)</sup>, V. S. Latypova<sup>2)</sup>,  
D. A. Podgrudkov<sup>1),2)</sup>, T. M. Roganova<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University, Russia*

<sup>2)</sup>*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Russia*

The primary cosmic ray composition in the 1–1000 PeV region is an important field in the study of cosmic ray origin and propagation. Based on the SPHERE-2 balloon installation operating experience the SPHERE-3 installation with a higher aperture and a better optical resolution is being developed. This paper presents the current status of work on the detector design, its optical system, recording equipment based on silicon photomultipliers, as well as a system for recording and collecting experimental data.