



ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТЕЛЕСКОПА СФЕРА-3 ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ПЕРВИЧНОЙ ЧАСТИЦЫ ШАЛ

© 2026 г. Е. А. Бонвеч^{1, *}, О. В. Черкесова^{1, 2}, Д. В. Чернов¹, Е. Л. Энтина¹,
В. И. Галкин^{1, 3}, В. А. Иванов^{1, 3}, Т. А. Колодкин^{1, 3}, Н. О. Овчаренко^{1, 3},
Д. А. Подгрудков^{1, 3}, Т. М. Роганова¹, М. Д. Зива^{1, 4}

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

²Факультет космических исследований, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Факультет вычислительной математики и кибернетики, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: bonvech@yandex.ru



Представлены новые результаты моделирования работы нового черенковского телескопа СФЕРА-3. Телескоп будет способен регистрировать космические частицы одновременно по прямому и отраженному черенковскому свету ШАЛ. В случае двойной детекции точность определения параметров первичной частицы повышается. Исследование проводится на основе банка данных распределений черенковского света ШАЛ, полученного на суперкомпьютере Ломоносов-2. Приведены оценки точности определения энергии и типа первичной частицы по отраженному и прямому потоку черенковского света.

DOI: 10.56304/S2079562926010045

1. ВВЕДЕНИЕ

В проекте СФЕРА изучение космических лучей с энергиями выше 5 ПэВ проводится методом регистрации отраженного от снежной поверхности земли черенковского света А.Е. Чудакова [1]. Этот метод был успешно реализован в эксперименте с аэростатным черенковским телескопом СФЕРА-2 [2]. В настоящее время разрабатывается новый телескоп СФЕРА-3, главной задачей которого будет детальное изучение химического состава ПКЛ с энергиями выше 1 ПэВ. Телескоп будет подниматься над поверхностью земли на высоту до 1.5 км с помощью специального дрона и регистрировать как отраженный от снежной поверхности свет ШАЛ, так и прямой черенковский свет одного и того же ливня. Телескоп будет состоять из двух отдельных детекторов — детектора отраженного черенковского света и детектора прямого света. Общий вид конструкции телескопа приведен на рис. 1. Конструкция детекторов телескопа будет оптимизирована для задачи измерения массового состава ПКЛ.

Конструкция телескопа отраженного света помимо традиционной для этого проекта шмитовской оптической системы будет включать кор-

ректирующую линзу [3]. Конструкция телескопа прямого света пока не определена окончательно, рассматриваются несколько вариантов.

В этой статье описаны актуальные методы и их точности для определения параметров первичной частицы по отраженному и прямому черенковскому свету ШАЛ в текущей модели телескопа СФЕРА-3. Показаны детали определения этих параметров, связанные с особенностями эксперимента.

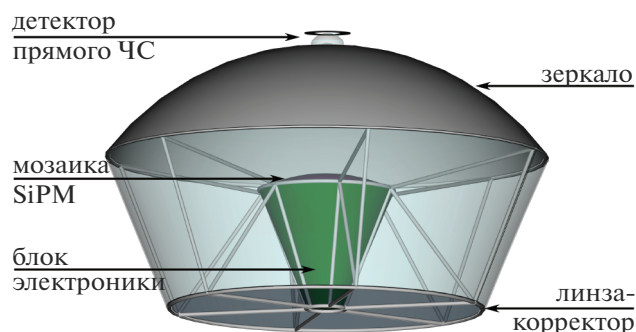


Рис. 1. Схематическое представление телескопа СФЕРА-3.

Таблица 1. Статистика базы данных ORCHID

	Модель взаимодей-я	Ядро	Модели атмосферы	Шаг по углам, °	Высоты, 0.455 +, км	Кол-во ливней
1	QGSJET01	p, He, N, Al, S, Fe	1, 3, 4, 11	1.0	0.5, 1.0, 2.0	27770
2	QGSJETII-04	p, He, N, Al, S, Fe	1, 3, 4, 11	1.0	0.5, 1.0, 2.0	27224
3	QGSJETII-04	p, He, N, Fe	1, 3, 4, 8, 11	0.2	0.5, 1.0, 1.5	28800
4	Sibyll 2.3	p, He, N, Fe	1, 3, 4, 8, 11	0.2	0.5, 1.0, 1.5	36900

2. БАЗА ДАННЫХ ORCHID

Конструкция черенковского телескопа SPHERE-3 в настоящее время находится в стадии оптимизации. Одновременно разрабатываются процедуры для оценки параметров первичной частицы и определяются алгоритмы триггера для обоих детекторов. Кроме того, ведется поиск характеристик формы изображения в детекторе прямого света, наиболее чувствительных к массе первичной частицы, но нечувствительных к моделям взаимодействия и атмосферным моделям. Для этого потребовалась большая база данных смоделированных событий ШАЛ. Это стало возможным с использованием мощного суперкомпьютера МГУ Ломоносов–2 [5].

Черенковский свет широких атмосферных ливней генерировался с использованием кода CORSIKA [6]. В итоговый выходной файл сохраняется информация о черенковских фотонах на четырех уровнях наблюдения: на поверхности снега (455 м над уровнем моря, т.е. на высоте поверхности озера Байкал) и на возможных высотах расположения телескопа — 500 м, 1000 м и 1500 м над поверхностью снега. На начальном этапе расчетов максимальная высота полета составляла 2000 м вместо 1500 м.

На уровне снега записывается пространственно—временное распределение фотоэлектронов (т.е. тех фотонов, которые будут зарегистрированы светочувствительной мозаикой телескопа и произведут фотоэлектрон в светоприемнике — кремниевом фотоумножителе). Пространственный шаг распределения фотоэлектронов составляет 2.5 м в квадрате со стороной 3 км, дискретность времени — 5 нс.

На высотах полета телескопа (500 м, 1000 м и 1500 м) регистрируются угловые, пространственные и временные распределения черенковских фотонов. Мы начали с углового разрешения 1.0° , но оказалось, что этого недостаточно для точности, необходимой для определения характеристик частицы по прямому черенковскому излучению. Сейчас базовое угловое разрешение составляет 0.2° . Пространственное разрешение составляет 10 м, а временная структура состоит из 13 ячеек, каждая шириной 5 нс.

Были рассчитаны распределения черенковских фотонов для шести различных первичных ядер (p, He, N, Al, S и Fe) с энергиями 5, 10 и 30 ПэВ, ис-

пользуя три различные модели взаимодействия (QGSJET01 [7–9], QGSJETII-04 [10, 11] и Sibyll 2.3 [12–18]). Кроме того, были рассмотрены пять различных моделей атмосферы из доступных в пакете CORSIKA (1, 3, 4, 8 и 11). Зенитные углы прихода первичной частицы варьировались от 5° до 30° с шагом в 5° , азимутальный угол выбирался случайным образом.

Для каждого набора входных параметров (энергия, тип частиц, модель взаимодействия, модель атмосферы и зенитный угол) было смоделировано чаще всего по 100 уникальных событий. В настоящее время банк событий содержит более 100000 изображений черенковских распределений света. Мы планируем расширить нашу базу данных, включив в нее события с энергией 100 ПэВ и выше. Статистика количества событий в базе данных ORCHID (Open Refined Cherenkov Image Database) представлена в табл. 1. Исследователи, заинтересованные в наших данных, могут получить к ним доступ по запросу.

Каждое уникальное смоделированное распределение черенковского света используется для создания 100 независимых копий исходного события путем пространственного смещения оси ШАЛ относительно оси телескопа. Затем все эти клоны обрабатываются с помощью алгоритмов моделирования оптической системы телескопа, которое основано на пакете Geant4 [19–21] и имитирует прохождение фотонов через детектор отраженного или прямого черенковского света. Заключительный шаг — это моделирование сбора фотонов с помощью светоприемника детектора и получение образа ливня в детекторе.

3. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ШАЛ

Распределения света (образ ливня) в детекторе отраженного черенковского света аппроксимируются с помощью функции пространственного распределения (ФПР), параметры которой позволяют оценить направление прихода, энергию и массу первичной частицы. Оценки точности определения параметров первичных частиц для детектора отраженного света, приведенные ниже, были получены с использованием выборки из 13500 событий, если не указано иное. Эта выборка состояла из 1500 событий для каждого из типов протонов, ядер азота и железа с энергиями 5, 10 и 30 ПэВ.

3.1. Оптимизация модели детектора отраженного света

Для проверки текущей модели геометрии детектора отраженного света [3] был смоделирован поток фотоэлектронов, направленных к детектору. Фотоны исходили из сектора круга размером в одну четверть поля зрения детектора на снегу, с плотностью 50 фотоэлектронов на элемент пространственной матрицы. Анализ смоделированных образов в детекторе показал, что примерно 10% света, регистрируемого мозаикой фотодетектора, попадает за пределы номинального поля зрения. Этот эффект проявляется наличием линий временного сдвига в сигнале, возникающих в результате множественных переотражений в оптической системе. Анализ времен оптического пути фотоэлектронов от снежной поверхности до детектора в модели оптической системы на рис. 1 (слева) выявил несколько устойчивых линий в распределении времен, соответствующих паразитным фотоэлектронам и многократному переотражению. Кроме того, было замечено, что свет из указанного сектора регистрировался почти по всей мозаике, затрагивая до 70% сегментов мозаики.

Чтобы повысить точность математического моделирования оптического отклика детектора, в конструкцию детектора были включены поглотители. В частности, поглотитель был размещен вокруг каждого отдельного пикселя, чтобы гарантировать регистрацию только света, падающего сверху. Результатом этих модификаций стало более точное воспроизведение образа светящегося сегмента в мозаике детектора и значительное сокращение количества паразитных фотоэлектронов, возникающих вне поля зрения детектора. Введение дополнительных элементов в геометрию детектора привело к значительному сокращению количества линий (см. рис. 1 справа), соответствующих многократному переотражению.

Изменения, внесенные в геометрию детектора, позволили корректно воспроизвести пространственный рисунок фотоэлектронов на мозаике детектора и значительно снизить влияние света из-за пределов поля зрения. Количество паразитных фотоэлектронов и интенсивность линий временного сдвига в распределении времени были значительно уменьшены. Сравнение пространственного и временного распределения сигналов в предыдущей и оптимизированной геометрии детектора показывают, что в обновленной конфигурации пространственная картина регистрируемых фотоэлектронов более точно соответствует ожидаемому распределению, а интенсивность временных линий вне поля зрения детектора значительно снижена.

3.2. Определение оси ливня

3.2.1 Отбор событий внутри поля зрения детектора

Положение оси ливня на поверхности земли определяется по распределению света на мозаике фотоприемников детектора отраженного черенковского света. Положение оси ливня определяется как проекция на снег центра масс интегральных сигналов в пикселях вокруг пикселя с максимальным сигналом на мозаике. Точность определения оси по отраженному свету зависит от высоты телескопа и составляет от 5 ± 3 м на высоте телескопа 500 м до 8 ± 5 м на высоте 1000 м, если ось находится в пределах зрения детектора. Если ось ливня находится за пределами поля зрения, то восстановление параметров ливня не представляется возможным. Основным критерием исключения таких событий из последующего анализа является положение пикселя с максимальным сигналом на краю мозаики фотоприемников. Однако оказалось, что в некоторых случаях, когда ось находится вне поля зрения детектора, этот простой критерий может не работать. Для фильтрации таких событий были разработаны новые критерии, описанные ниже.

3.2.2. Отбор классическими методами

Для целей восстановления энергии и массы первичной частицы по детектору отраженного света пространственное распределение проинтегрированного во времени сигнала на мозаике аппроксимируется аксиально-симметричной функцией [3]. Форма этой функции участвует в критерии определения массы первичной частицы, а полный интеграл служит мерой ее энергии [22]. Однако в случае, когда ось широкого атмосферного ливня лежит вне поля зрения телескопа, значительная часть информации о распределении света теряется, что приводит к ошибке в определении формы распределения света и, следовательно, оценок первичных параметров. При малом числе зарегистрированных фотонов или при близости оси к краю мозаики из-за нехватки информации и больших флуктуаций в числе регистрируемых фотонов ось определяется на мозаике, хотя в действительности находится вне ее. Это может привести к значительным ошибкам. В статье [22] описан метод решения этой проблемы. После оптимизации модели детектора отраженного света, описанной в разделе 3.1, и увеличения выборки событий метод был усовершенствован.

Идея метода заключается в дополнительной аппроксимации распределения фотонов плоскостью. В случае, если ось ШАЛ находится вне мозаики, на детектор попадает лишь периферийная часть распределения, и форма распределения света на мозаике оказывается существенно более плос-

кой, чем для событий, в которых ось действительно попадает в поле зрения телескопа. Это отличие используется для построения критерия, основанного на доступных в эксперименте параметрах, позволяющего выделять оси, ошибочно определенные на мозаике. Среди различных рассмотренных вариантов критерия наилучшее разделение показал следующий критерий K :

$$K = \left(\frac{f_{\text{surf}}}{q_1} - \frac{f}{q_2} \right), \quad (1)$$

где, f_{surf} и f функции, характеризующие средне-квадратичную (χ^2) точность аппроксимации плоскостью и аксиально-симметричной функцией, соответственно, q_1 и q_2 — число степеней свободы аппроксимации. Как оказалось, граница разделения по величине K зависит от энергии.

На всей мозаике критерий (1) в среднем отсекает 53.1% событий с осью вне поля зрения и 8.2% событий, ось которых действительно лежит на ней. На внутренних сегментах мозаики, без двух граничных слоев сегментов, он позволяет устранить 95% образов с ошибочно определенной осью, при потере 8.6% корректных данных.

На двух граничных слоях сегментов критерий (1) мало эффективен, но примерно у 90% всех событий с осью вне поля зрения она определяется на последних двух слоях сегментов мозаики. Это привело к необходимости ввести еще один критерий отбора: не рассматривать события, у которых ось аппроксимирующей функции попадает на последние два слоя сегментов мозаики. В этом случае теряется примерно 30% регистрирующей площади, но возрастает надежность определения параметров.

Одновременная работа этих двух критериев позволяет устранить 99% событий с осью, ошибочно лежащей на мозаике, при потерях 24–40% корректных событий, в зависимости от массы частицы. Двойной критерий отбора значительно улучшает точность оценки энергии, что описано в разделе 3.3.

3.2.3. Отбор нейросетевыми методами

Разработка нейросетевого метода фильтрации событий вне поля зрения велась на базе смоделированных данных, включающих события EAS в наборе энергии (5, 10, 30 ПэВ), наборе типов первичной частицы (p, N, Fe), при различных углах входа частицы в атмосферу и фиксированной высоте телескопа. В качестве первого подхода была реализована сверточная нейросеть, обученная предсказывать расстояние от телескопа до оси ливня. На основе предсказанного расстояния определялся оптимальный порог, позволяющий отделять события с некорректно определенной осью. При выбранном пороге в 210 м (то есть завышенном относи-

тельно реальной границы видимости в 180 м) удастся отфильтровать 71% ложных событий с потерей лишь 2.3% истинных.

Для дальнейшего повышения эффективности фильтрации был предложен дополнительный метод на основе автоэнкодера с архитектурой, включающей блок Spatial Transformer Network. Это позволило нейросети самостоятельно находить оптимальную ориентацию светового пятна в детекторе, улучшая реконструкцию симметричных образов, характерных для истинных осей ШАЛ. Несмотря на то что автоэнкодер самостоятельно не обеспечивает хорошей фильтрующей способности, его комбинация с регрессионной моделью позволила довести эффективность фильтрации до 85% при сохранении 97.8% истинных событий.

3.3 Оценка энергии первичной частицы

Для оценки энергии первичной частицы необходима информация о положении оси на снегу и полный интеграл аппроксимирующей образ аксиально-симметричной функции. Для каждой энергии строится набор зависимостей этого интеграла от расстояния от оси телескопа до оси ливня для всех частиц, независимо от их типа, и с дифференциацией по типу ядра частицы. Энергия первичной частицы оценивается путем сопоставления полученных в эксперименте значений интеграла и расстояния до оси с этим набором зависимостей. Если тип частицы известен, то энергия определяется по набору зависимостей для этого известного ядра. Если тип частицы не известен, то энергия определяется по набору зависимостей для всех частиц.

До применения критерия, описанного в разделе 3.2.2, точность оценки энергии составляла 34% и 27% в случае неизвестной и известной массы первичной частицы соответственно. После применения критерия фильтрации ошибочно определенных на мозаике осей средняя ошибка уменьшилась до 15% и 8%, соответственно. Приведенные ошибки усреднены по энергиям и массам.

3.4. Определение направления

Направление прихода первичной частицы может быть определено и по отраженному и по прямому черенковскому свету ШАЛ. Определение направления частицы по отраженному черенковскому свету проводится путем построения проекции временной структуры регистрируемого на мозаике сигнала на снег с последующей аппроксимацией его квадратичной функцией [3]. Точность определения угла прихода первичной частицы по отраженному свету этим методом слабо зависит от высоты и составляет 1–2°.

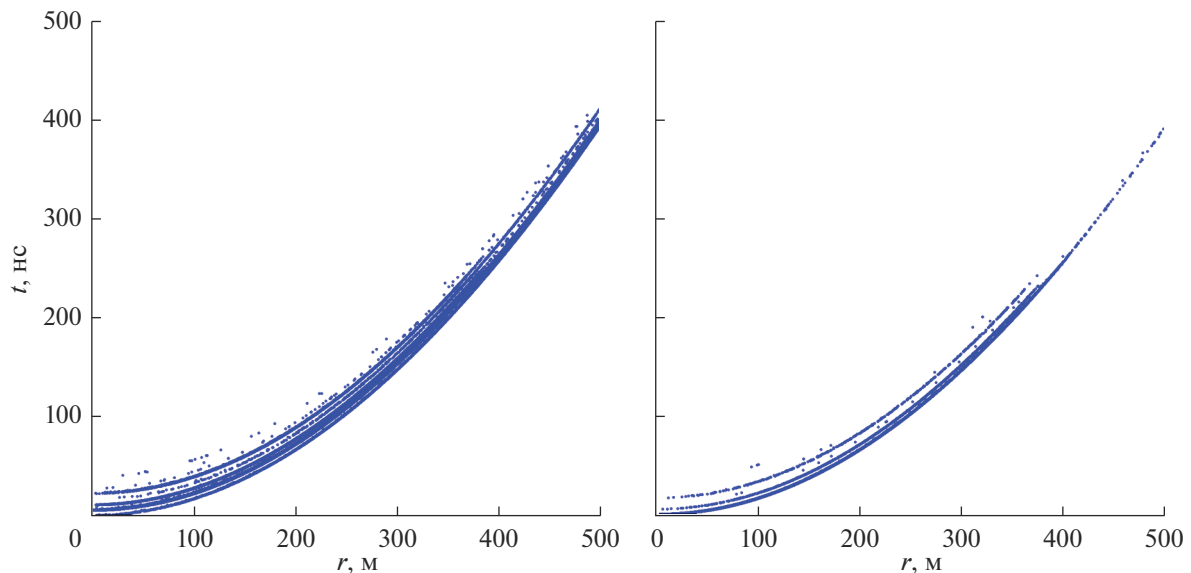


Рис. 2. Распределение времени оптического пути, представленные в виде отдельных точек, для двух конфигураций детекторов: левая панель соответствует предыдущей версии, правая панель иллюстрирует обновленную конфигурацию.

3.4.1. Оценка направления по детектору прямого света

Методика определения направления прихода частиц по прямому черенковскому свету ШАЛ была разработана сначала с использованием модели углового распределения света, падающего на детектор. Такой вариант демонстрирует наилучшую точность определения направления, которую, в принципе, можно достичь с помощью выбранного метода. Потом метод был перенесен на анализ образов черенковского света в детекторе чтобы оценить точность, ожидаемую в эксперименте с детектором.

В обоих случаях используется асимметрия светового пятна в поле зрения детектора. Эта асимметрия заключается в том, что максимум распределения света находится достаточно далеко от его центра тяжести (см рис. 2). Прямая линия, проведенная через максимум и центр тяжести, указывает на реальное направление оси ШАЛ. Разница между истинным направлением и центром тяжести или максимумом зависит от расстояния от детектора до оси ливня и составляет приблизительно $1\text{--}3^\circ$. Чтобы учесть эту разницу, мы вычисляем ее среднее значение по данным модели для каждого расстояния (отдельно для максимального и центра тяжести), а затем вычитаем его из координат соответствующей точки. Результат отличается от фактического направления в среднем на 0.05° для максимума и 0.14° для центра масс для случая анализа углового распределения детектором, находящимся на высоте 500 м на расстоянии 100 м от оси ливня, для различных первичных частиц с энергией 10 ПэВ. В случае анализа изображе-

ния черенковского света в детекторе ошибки увеличиваются до 0.12° для максимума и 0.16° для центра масс при том же расстоянии 100 м от оси ливня.

3.5. Классификация частиц

3.5.1. Классификация по отраженному свету

При оценке качества проектируемого детектора отраженного света используются критерии, ориентированные на точность определения массы первичной космической частицы по изображению на мозаике детектора, что является основной задачей эксперимента СФЕРА-3. Разработан метод оценки массового состава космических лучей в диапазоне энергий $1\text{--}100$ ПэВ по отраженному черенковскому свету ШАЛ для детекторов типа СФЕРА [23]. В этом методе для разделения первичных частиц по массе используется одномерный критерий, основанный на аппроксимации образа на мозаике функцией пространственного распределения черенковских фотонов. В данной работе применяется новейшая версия ФПР, подробно описанная в [23].

Форма распределения черенковского излучения, характеризуемая безразмерным параметром, вычисляемым по изображению света в детекторе, хорошо коррелирует с продольным развитием ливня. Критерий разработан как интегральный, то есть учитывающий большую часть излучения в черенковском образе, что позволяет подавлять флуктуации. Он лишь слабо зависит от модели сильного взаимодействия, поскольку основывается на относительных, а не на абсолютных характеристиках образа распределения света [3].

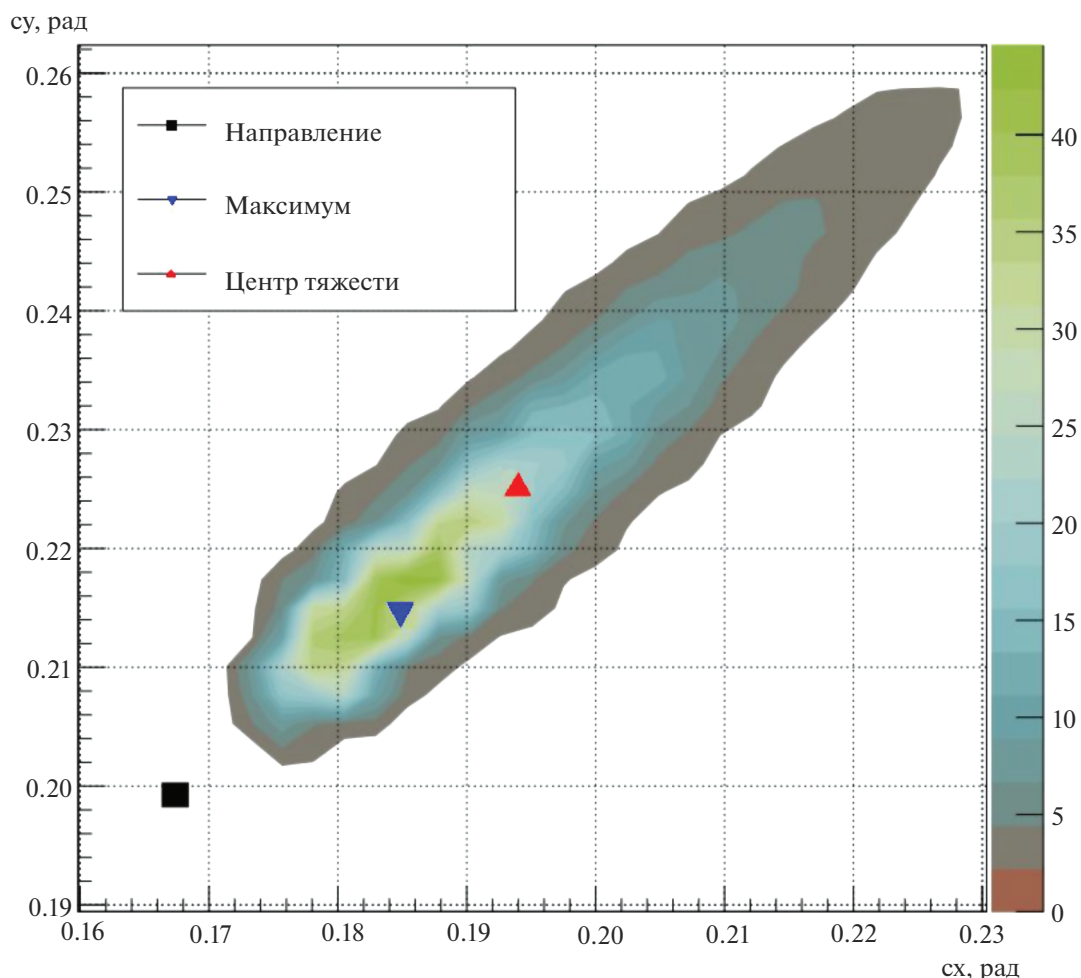


Рис. 3. Угловое распределение черенковского света в поле зрения детектора. Точки указывают направление прихода ШАЛ (квадрат), максимум (треугольник, направленный **вверх**) и центр тяжести распределения света (треугольник, направленный **вниз**).

Для ливней с зенитным углом 10° и энергией первичной частицы 10 ПэВ для разделения на три группы ядер (протон, азот, железо) в качестве основного критерия оценки качества детектора была выбрана максимальная ошибка разделения. Для текущей версии детектора граница между протоном и азотом соответствует доле ошибочной классификации 36.4% для протонов, граница между азотом и железом — 36.7% для ливней от первичного ядра железа.

3.5.2. Классификация по прямому свету

Одной из основных целей проекта СФЕРА является разработка метода, позволяющего определять значения массы первичных частиц, вызвавших зарегистрированный ШАЛ. Для этой цели необходимо найти параметр распределения черенковского света, чувствительный к массе. Простым и относительно дешевым способом провер-

ки параметра является построение схемы классификации ядер на 3 группы: протоны, азот и железо.

В настоящий момент основным классифицирующим параметром образа ШАЛ в детекторе прямого черенковского света является длина большей оси образа света. При классификации на две группы ядер, протонов и азота, частица классифицируется как протон если длина этой оси превышает определенное пороговое значение. И наоборот, если длина оси меньше порогового значения, частица относится к категории азота. В случае классификации по группам азот–железо частицы с длиной осью, превышающей пороговое значение, классифицируются как азот, а с осью короче порогового значения — как частицы железа.

Поскольку длина большей оси образа черенковского света является параметром формы, она слабо зависит от модели ядерного взаимодействия, но зависит от других характеристик ливня, таких как энергия первичной частицы, расстоя-

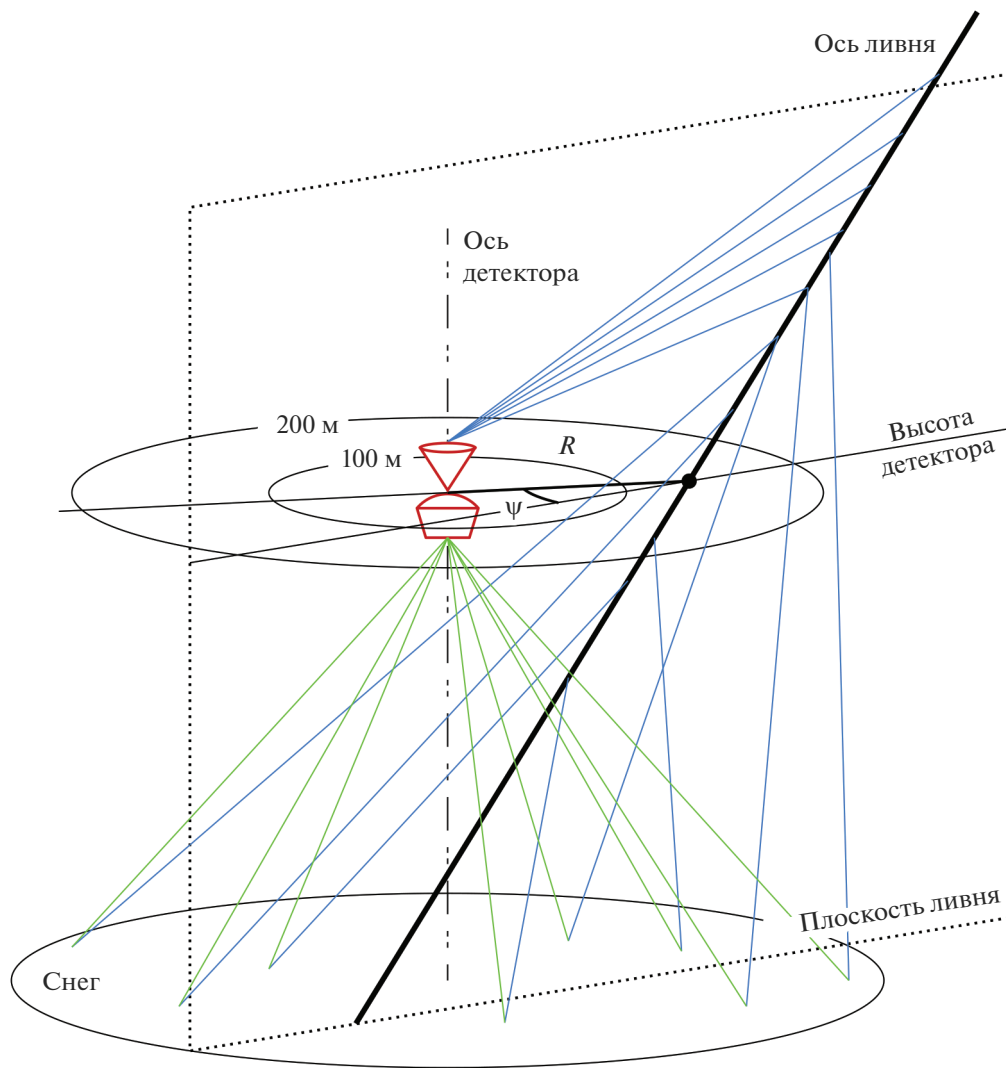


Рис. 4. Геометрия регистрации ШАЛ на двух высотах. Отраженный черенковский свет (зеленые линии) собирается детектором отраженного света, направленным вниз, прямой свет (синие линии) регистрируется детектором, направленным вверх.

ние от оси до детектора на высоте полета и азимутальное положение детектора относительно оси ливня. В связи с этим возникает необходимость ввести пороговый критерий в виде набора значений, зависящих от азимутального положения детектора и расстояния от детектора до оси ливня. Без его использования вероятность неправильной классификации первичной частицы может достигать 0.4. Для дальнейшего улучшения критерия используется зависящий от расстояния абсолютный порог — число фотонов в ячейке образа, при превышении которого ячейка считается частью образа. Это связано с тем, что при приближении детектора к оси ливня число света в образе увеличивается и требуется более высокий порог. Использование порога, зависящего от расстоя-

ния, позволило получить ошибки классификации в диапазоне 0.23–0.31.

3.5.3. Двойная классификация

Поскольку телескоп СФЕРА-3 будет включать в себя детекторы как прямого, так и отраженного света, был разработан метод оценки массы, использующий данные обоих детекторов. Так как данные двух детекторов независимы, такой метод позволяет добиться уменьшения ошибок классификации.

Стоит отметить, что для применения метода двойной классификации при высоте полета детектора 500 м над уровнем снега необходимо, чтобы на высоте полета расстояние от детектора до оси ливня было не больше 200 и не меньше 100 м,

а расстояние от точки пересечения оси ливня со снегом до проекции детектора на снег не превышало 175 м. Моделирование показало, что таких событий примерно около трети от всех регистрируемых событий. Взаимное положение детектора и ливня при двойной регистрации показано на рис. 4.

Для двойной классификации каждое рассматриваемое событие представляется в виде точки в двумерном пространстве признаков. Для образа прямого света в качестве признака используется длина большой оси, а для отраженного — отношение интегралов по внутреннему кругу образа и по внешнему кольцу. Затем находится разделяющая прямая, минимизирующая ошибки классификации. Использование двойной классификации снизило погрешности классификации до 0.14–0.22.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье приведены актуальные результаты по определению параметров частиц космического излучения новым телескопом СФЕРА–3. Описаны отдельные процедуры, разработанные для независимого определения параметров частиц по данным детекторов отраженного и прямого черенковского света ШАЛ, приведены их точности. Классификация частиц по массе проводится как по данным двух детекторов независимо, так и совместно. Двойная регистрация частицы повышает точность определения ее типа по сравнению с использованием детекторов по отдельности. В ближайшем будущем предстоит создать самосогласованную процедуру определения всех параметров частиц с учетом данных обоих детекторов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М. В. Ломоносова [5].

Настоящая работа выполнена при поддержке Российского научного фонда по гранту № 23–72–00006, <https://rscf.ru/project/23-72-00006/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

- Чудаков А.Е. Труды Всесоюз. симп. Материалы Всесоюз. симп., Якутск., **620**, 69 (1972)
- Chernov D.V., Antonov R.A., Aulova T.V., Bonvech E.A., Galkin V.I., Dzhatdov T.A., Podgrudkov D.A., Roganova T.M. Phys. Part. Nucl. **46**(1), 60 (2015). <https://doi.org/10.1134/S1063779615010025>
- Chernov D.V., Azra C.J., Bonvech E.A., Cherkesova O.V., Entina E.L., Galkin V.I., Ivanov V.A., Kolodkin T.A., Ovcharenko N.O., Podgrudkov D.A., Roganova T.M., Ziva M.D. Phys. At. Nucl. **87**(S2), S319 (2024). <https://doi.org/10.1134/S1063778824700959>
- Dzhatdov T.A., Bonvech E.A., Cherkesova O.V., Chernov D.V., Entina E.L., Galkin V.I., Ivanov V.A., Kolodkin T.A., Ovcharenko N.O., Podgrudkov D.A., Roganova T.M. and Ziva M.D. PoS (ICRC2025) **501**, 1357 (2025)
- Voevodin V.V., Antonov A.S., Nikitenko D.A., Shvets P.A., Sobolev S.I., Sidorov I.Yu., Stefanov K.S., Voevodin V.V., Zhumatiy S.A. J. Supercomp. Frontiers and Innovations **6**(2), 4 (2019). <https://doi.org/10.14529/jsfi190201>
- Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N., Schatz G. and Thouw T. Report FZKA, **6019** (1998). <https://www.iap.kit.edu/corsika/70.php>
- Kalmykov N.N. and Ostapchenko S.S. Phys. At. Nucl. **56**(3), 346 (1993).
- Калмыков Н.Н., Остапченко С.С. и Павлов А.И. Изв. РАН., сер. физ., **58**, 1966 (1994).
- Kalmykov N.N., Ostapchenko S.S. and Pavlov A.I. Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), **52B**, 17 (1997).
- Ostapchenko S.S. Phys. Rev. D, **83**, 014018 (2011).
- Ostapchenko S. Phys. Rev. D, **89**, 074009 (2014).
- Engel J., Gaisser T.K., Lipari P. and Stanev T. Phys. Rev. D, **46**, 5013 (1992).
- Fletcher R.S., Gaisser T.K., Lipari P., and Stanev T. Phys. Rev. D, **50**, 5710 (1994).
- Engel R., Gaisser T.K., Lipari P., and Stanev T. Proc. 26th ICRC, Salt Lake City, **1**, 415 (1999).
- Ahn E.-J., Engel R., Gaisser T.K., Lipari P. and Stanev T. Phys. Rev. D, **80**, 094003 (2009).
- Riehn F., Engel R., Fedynitch A., Gaisser T.K. and Stanev T. Proc. 34th ICRC, The Hague, 1313 (2015). arXiv: 1510.00568v1[hep-ph]
- Riehn F., Dembinski H.P., Engel R., Fedynitch A., Gaisser T.K. and Stanev T. PoS(ICRC2017), **301**, 301 (2017). <https://doi.org/10.22323/1.301.0301>
- Riehn F., Engel R., Fedynitch A., Gaisser T.K. and Stanev T. Phys. Rev. D, **102**, 063002 (2020). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.063002>
- Agostinelli S., Allison J., Amako K., Apostolakis J., Araujo H., Arce P., Asai M., Axen D., Banerjee S., Barrand G., Behner F., Bellagamba L., Boudreau J., Broglia L., Brunengo A., Burkhardt et al. NIM A, **506**, 250 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
- Allison J., Amako K., Apostolakis J., Araujo H., Dubois P., Arce P., Asai M., Barrand G., Capra R., Chauvie S., Chytrcek R., Cirrone G.A.P., Cooperman G., Cosmo G., Cuttone G., Daquino G.G., Donszelmann M. et al. IEEE Trans. Nucl. Sci. **53**, 270 (2006). <https://doi.org/10.1109/TNS.2006.869826>
- Allison J., Amako K., Apostolakis J., Arce P., Asai M., Aso T., Bagli E., Bagulya A., Banerjee S., Barrand G., Beck B.R., Bogdanov A.G., Brandt D., Brown J.M.C., Burkhardt H., Canal Ph. et al. NIM A, **835**, 186 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125>
- Bonvech E.A., Cherkesova O.V., Chernov D.V., Entina E.L., Galkin V.I., Ivanov V.A., Kolodkin T.A., Ovcharenko N.O., Podgrudkov D.A., Roganova T.M., Ziva M.D. arXiv:2505.06723 [astro-ph.HE] (2025). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.06723>
- Latypova V.S. and Galkin V.I. Уч. записки физ. фак. МГУ, **2023**(4), 2341604 (2023).

Estimation of the Capabilities of the SPHERE-3 Telescope to Determine the Parameters of the Primary Particle of an Extensive Air Shower

E. A. Bonvech^{a, *}, O. B. Cherkesova^{a, b}, D. B. Chernov^a, E. L. Entina^a, V. I. Galkin^{a, c}, V. A. Ivanov^{a, c},
T. A. Kolodkin^{a, c}, N. A. Ovcharenko^{a, c}, D. A. Podgrukov^{a, c}, Roganova^a, and M. D. Ziva^{a, d}

^a*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, 119991, Russia*

^b*Faculty of Space Research, Moscow State University, Moscow, 119991, Russia*

^c*Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow, 119991, Russia*

^d*Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Moscow State University, Moscow, 119991, Russia*

*e-mail: bonvech@yandex.ru

Abstract—New results of modeling the operation of the new Cherenkov telescope SPHERE-3 have been presented. The telescope will be able to detect cosmic particles simultaneously using the direct and reflected Cherenkov light of an extensive air shower. In the case of double detection, the accuracy of determining the parameters of the primary particle increases. The study has been carried out using the database of distributions of Cherenkov light from extensive air showers obtained on the Lomonosov-2 supercomputer. The accuracy of determining the energy and type of the primary particle from the reflected and direct flows of Cherenkov light has been estimated.