

Восстановление направления прихода ШАЛ по отраженному от снега черенковскому свету

К.Ж. Азра,* Е.А. Бонвеч†

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

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

(Поступила в редакцию 09.06.2024; подписана в печать 17.02.2025)

Определение направления прихода широких атмосферных ливней (ШАЛ) является важной частью методики анализа данных в эксперименте СФЕРА. Знание направления необходимо для построения оптимального критерия разделения ядер, позволяющего определить массовый состав первичных космических лучей. В настоящей работе приведена поэтапная разработка алгоритма восстановления направления ливней для телескопа СФЕРА-2 и СФЕРА-3, основанного на параболической аппроксимации фронта черенковского света ШАЛ. Алгоритм разрабатывается и тестируется на базе искусственных событий ШАЛ, а также применен к экспериментальным событиям, полученным телескопом СФЕРА-2.

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) — поток заряженных частиц, заполняющих космическое пространство и постоянно бомбардирующих атмосферу Земли. Поток космических лучей, попадающий на Землю, практически постоянен во времени, изотропен и составляет примерно $1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ до входа в земную атмосферу. Энергетический спектр галактических космических лучей имеет диапазон 10^9 - 10^{21} эВ.

При попадании в атмосферу Земли частица космических лучей взаимодействует с атомами атмосферы, в результате чего создается большое количество вторичных частиц, так называемый широкий атмосферный ливень (ШАЛ). Частицы ПКЛ с энергиями ниже 10^{15} эВ регистрируются орбитальными детекторами. При энергии выше 10^{15} эВ потоки космических лучей становятся редкими, для изучения используются наземные установки, покрывающие площади в несколько сотен квадратных километров. Один из методов регистрации ШАЛ, предложенный А.Е. Чудаковым в 1972 г. [1], заключается в измерении пространственно-временной структуры отраженного от снега черенковского света ШАЛ прибором, поднятым в воздух над этой поверхностью. Эксперимент СФЕРА [2–4] реализует этот метод. Телескоп поднимается на высоту до 1 км и регистрирует отраженный от снега черенковский свет ШАЛ.

Установка СФЕРА-2 находилась в эксплуатации с 2008 по 2013 г., но основные данные были по-

лучены в ходе измерений, проведенных в 2011–2013 гг. [5]. В настоящее время разрабатывается установка СФЕРА-3 [6]. Новый детектор будет отличаться более широкой апертурой, лучшим пространственным разрешением и высокой эффективностью работы.

Целью настоящей работы является разработка алгоритма восстановления направления прихода ШАЛ по отраженному от снега черенковскому свету. Знание направления прихода ПКЛ позволяет правильно восстановить функцию пространственного распределения ливня, используемую для определения массового состава первичных космических лучей [7, 8].

1. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИХОДА ШАЛ

1.1. Банк событий

В настоящей работе разработка и тестирование алгоритма проводится на базе искусственных событий ШАЛ. Они моделируются с помощью программы CORSIKA [9]. Фотоны протягиваются на мозаику через модель детектора приложением Geant4 [10–12]. Для приближения к условиям эксперимента искусственные образы представляются в виде отклика, аналогичного экспериментальному. Используются выборки двух типов, содержащие только фотоны черенковского света ШАЛ (далее упоминаемые как «чистый сигнал»), и соответствующие им ливни, прошедшие через программу моделирования, имитирующую отклик детектора с учетом фона ночного неба и шумов электроники детектора (далее — «электронный сигнал»). Отклик — оцифрованные импульсы всех фотоприемни-

* clemenceanastasia@gmail.com

† bonvech@yandex.ru

ков с дискретностью 12.5 нс. Программа моделирования создает выходной файл с откликом так, что триггер срабатывает на 484 бине. Для телескопа СФЕРА-2 сгенерирован банк событий «чистого» и «электронного» сигнала для высот 500 и 900 м, трех ядер (p, N, Fe), двух энергий 10 и 30 ПэВ, для разных зенитных (от 10 до 20°) и азимутальных направлений (от 0 до 360°). Для телескопа СФЕРА-3 генерировались образы «чистого сигнала» для тех же ядер (p, N, Fe) с энергией 10 ПэВ, двух высот 500 и 1000 м, для зенитного угла 15° и азимутальных направлений (0–360°).

1.2. Выделение события в отклике

На первом этапе в событии ищется импульс от черенковского света в событии. Для поиска сигнала черенковского света суммируются амплитуды сигналов по всем измерительным каналам и получается полный суммарный импульс в отклике (рис. 1). Для отбора отклика «электронного сигнала» для дальнейшего анализа максимальная амплитуда суммарного сигнала должна превышать порог. Порог определен как средний фон до срабатывания триггера, к которому добавляются три значения стандартного отклонений данного среднего фона для учитывания флуктуаций. Порог записывается как \overline{BG}_{Σ} . Отбираются образы, которые хорошо выделяются из фона по амплитуде, т.е. амплитуда выше фоновых флуктуаций. Для этого для отбора образов этот порог умножается на два. Для отбора отклика для дальнейшего анализа максимальная амплитуда суммарного сигнала должна превышать порог \overline{BG}_{Σ} . Из анализа искусственных событий и геометрических соображений было определено, что длины суммарного импульса черенковского света находятся в пределах от 100 до 2000 нс. Более короткие сигналы могут быть шумовыми, а более длинные события могут быть калибровочными или шумовыми. Из-за фоновых флуктуаций, приводящих к неточности выделенного диапазона сигнала, к длительности выделенного импульса справа и слева добавляется по 30 ячеек. Примеры выделенного сигнала для разных типов исходных данных приведены на рис. 1.

1.3. Определение положения оси ливня

В выделенном событии в первую очередь определяется положение оси ливня. Независимо от происхождения образа, ось в нем находится одинаковым методом. Для этого находится измерительный канал, содержащий наибольшее число фотонов. Отклик не рассматривается, если данный канал расположен на последнем кольце мозаики, так как ось ливня находится за пределами поля зрения. Поскольку ось ливня может попасть между измерительными каналами, она определяется по центру тяжести сигналов измерительных каналов.

Результаты определения положения оси ливня приведены на рис. 2, а и рис. 2, б для телескопов СФЕРА-2 и СФЕРА-3 соответственно. Для телескопа СФЕРА-2 средняя точность определения оси составляет в лучшем случае 8 ± 4 м, для СФЕРА-3 — от 5 ± 3 м.

1.4. Выделение сигнала в измерительных каналах

Для откликов, прошедших отбор, отбираются измерительные каналы, входящие в образ черенковского света ливня и определяется время прихода фронта черенковского света ливня в каждом канале.

Для избежания выделения ложного сигнала и для уменьшения влияния флуктуаций фона сигнал в каждом канале усиливается методом суммирования со скользящим окном. При его применении фоновые сигналы затухают, а фотонные образы ШАЛ значительно усиливаются. Отбрасываются каналы со слабым сигналом, у которых максимальная амплитуда $\max(A_{pmt})$ в канале ниже среднего фона с тремя стандартными отклонениями среднего до срабатывания триггера \overline{BG}_{pmt} в этом же канале: $\max(A_{pmt}) > \overline{BG}_{pmt}$. Это первый критерий отбора каналов.

Теперь в отобранных измерительных каналах нужно выделить сигнал черенковского света. Исходя из конструкции мозаики, сигналы от черенковского света в соседних измерительных каналах должны перекрываться или быть очень близкими друг другу по времени. Тем самым поиск сигнала должен осуществляться по соседним измерительным каналам, начиная от самого яркого. Такому методу соответствует метод обхода графа в глубину. Время $\overline{t_{max}}$, в которое пришло максимальное число фотонов для определенного измерительного канала, должно находиться в определенном фиксированном диапазоне относительно соседних каналов $\overline{t_{max}} \pm n$ нс. Это второй критерий отбора каналов. В результате анализа имеющихся образов было определено $n = 100$ нс для СФЕРА-2 и $n = 50$ нс для СФЕРА-3.

Из физических соображений образ пятна черенковского света ливня должен быть неразрывным и не иметь одиночных измерительных каналов без соседей. Поэтому в качестве третьего критерия отбора каналов было поставлено условие, что каждый измерительный канал должен иметь по два соседних канала, с сигналами, удовлетворяющими второму критерию.

Каждый образ должен иметь не менее 20 или 60 измерительных каналов для СФЕРА-2 и СФЕРА-3 соответственно.

В отобранных каналах время прихода максимальной амплитуды сигнала считается моментом прихода ливня в этот канал.

Таким образом, на этом этапе алгоритма определяется фронт черенковского света ШАЛ на мозаике телескопа. Фронт состоит из набора координат x_i, y_i на мозаике центров измерительных каналов, входящих в образ, и времён прихода фронта в этот канал t_i , здесь i — номер измерительного канала.

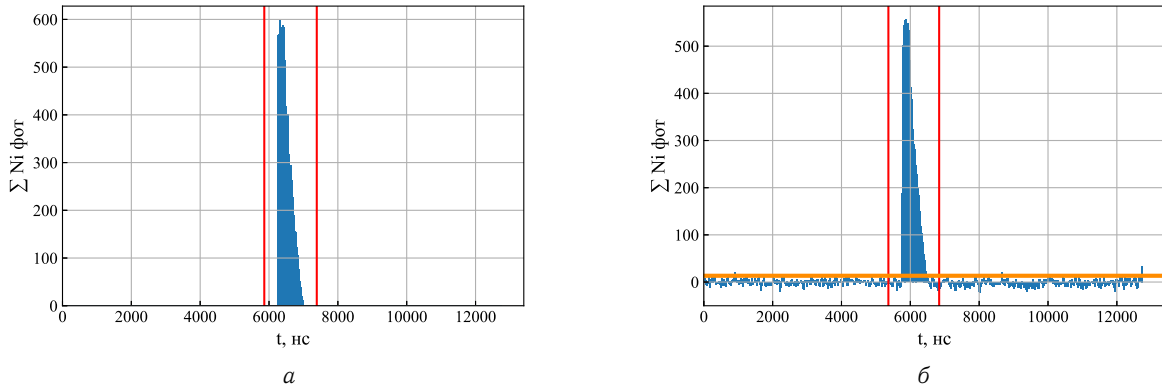


Рис. 1. Просуммированный по всем каналам сигнал для образов черенковского света от первичного протона для телескопа СФЕРА-2 с энергией 30 ПэВ и высотой 500 м для *a* — чистого сигнала, *б* — соответствующего ему электронного сигнала

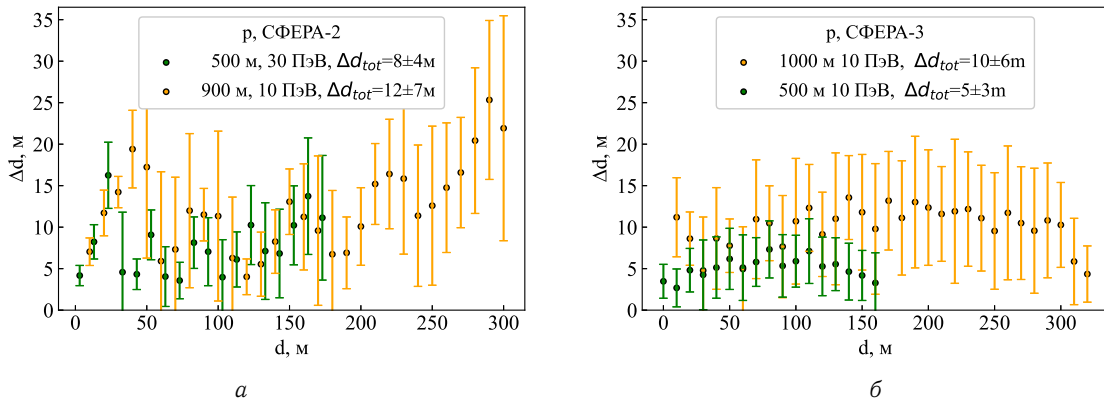


Рис. 2. Зависимость средних ошибок определения положения оси ливня от расстояния от оси ливня до оси телескопа для ШАЛ от протона для двух высот и двух телескопов: *a* — СФЕРА-2, *б* — СФЕРА-3

1.5. Трансляция ливня на снег

Образ фронта события ШАЛ транслируется на снег. Трансляция координат измерительных каналов проводится с помощью пересчета координат точки на мозаике к координатам этой же точки на снегу по зависимости, приведенная на рис. 3. Зависимости построены на основе моделирования. Моделировались фотоны, распределенные случайным образом на снегу в пределах квадрата 5×5 м, они протягивались на мозаику через модель детектора приложением Geant4. Находился центр тяжести полученного распределения на мозаике. Процедура повторялась несколько раз для квадратов, расположенных на разных расстояниях от оси установки с шагом 5 м в пределах поля зрения установки на снегу. Приведенная на рис 3 зависимость рассчитана для детектора, расположенного на высоте 500 м, но она может быть применена для любой высоты телескопа путем несложного приведения к нужной высоте установки.

Трансляция временных координат проводится через вычитание временного пути t_p , пройденного светом от

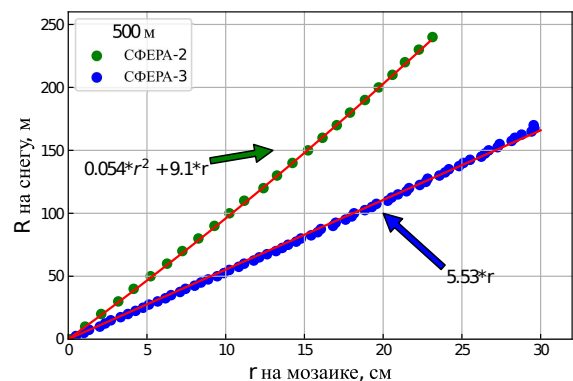


Рис. 3. Зависимость расстояния до оси установки на снегу от расстояния до оси телескопа на мозаике для телескопов СФЕРА-2 (зеленые точки) и СФЕРА-3 (синие точки)

центра поля зрения фотоэлемента на снегу до фотоэлемента на мозаике. Временные задержки фронта на

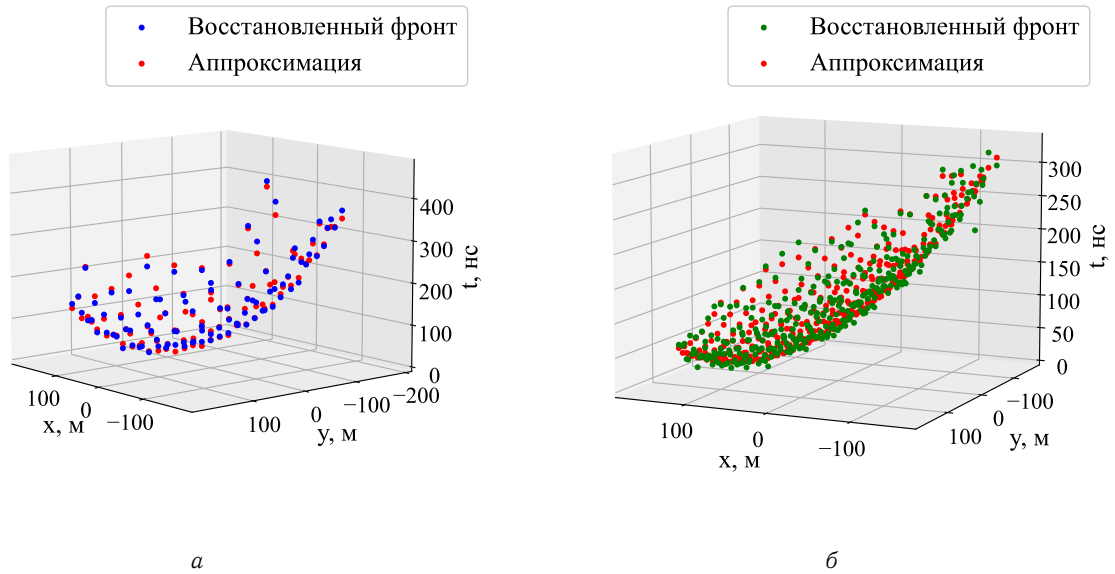


Рис. 4. Пример аппроксимации фронта ливня для телескопов *а* — СФЕРА-2 и *б* — СФЕРА-3: для чистого сигнала, высоты 500 м, протона. Для двух телескопов красным цветом нарисован аппроксимированный фронт

мозаике t_m преобразуются во временные задержки на снегу t .

1.6. Алгоритм восстановления направления

Фронт черенковского света ливня на снегу аппроксимируется взвешенным методом наименьших квадратов. Весу соответствует амплитуда сигнала. Алгоритм поиска направления использует метод MIGRAD программы Minuit [14].

Уравнение аппроксимирующей квадратичной функции фронта ливня:

$$t_{fit} = a_0 + a_1 R' + a_2 R'^2 + \frac{z'}{c}, \tag{1}$$

где a_0, a_1, a_2 — параметры фронта ливня в нс, нс/м, нс/м² соответственно; $R'(x', y')$ — расстояния от оси ливня до измерительного канала в системе ливня; преобразованные координаты $x', y', z'(\theta, \phi)$, где θ, ϕ — углы оси ливня в радианах.

Итак, на вход функции минимизации подаются x_i, y_i, t_i — пространственно-временные координаты фронта на снегу, а на выход — параметры a_0, a_1, a_2 , и углы θ, ϕ .

Из-за возможного наличия у минимизируемой функции нескольких локальных минимумов, результаты поиска минимума могут зависеть от начальных значений параметров. Поэтому, для нахождения глобального минимума мы применяем серию спусков из разных начальных точек по θ и ϕ , так называемый «много-стартовый спуск». Диапазон углов, применяемый для многостартового спуска:

- θ : от 0.05 до 0.35 рад с шагом 0.05;

- ϕ : от 0 до 6 рад с шагом 0.5.

За направление ливня принимается направление, соответствующее «глобальному минимуму». Под «глобальным минимумом» принимается минимум функции, значение которого меньше минимумов функции всех остальных спусков.

Параметр a_2 должен быть положительным, в противном случае структура ливня восстановилась в обратном направлении и выглядит, как перевернутая парабола, т.е. неправильным образом.

Примеры аппроксимации фронта черенковского света ШАЛ приведены на рис. 4,а для телескопа СФЕРА-2 и на рис. 4,б для СФЕРА-3. Оба образа просчитаны для черенковского света ШАЛ от первичного протона и телескопа, расположенного на высоте 500 м.

2. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ

Описанный выше алгоритм был применен к выборкам событий, описанным в разд. 1.1. По результатам применения критериев отбора ливней в каждой выборке искусственных событий отобрано около 45% ливней.

В результате применения алгоритма к выборкам искусственных событий были получены параметры фронта a_0, a_1, a_2 , которые немного зависят от положения оси ливня. Средние значения параметров следующие:

- a_0 — 66.0 ± 21.5 ,
- a_1 — 0.35 ± 0.12 ,
- a_2 — $(6.3 \pm 0.5) \times 10^{-3}$.

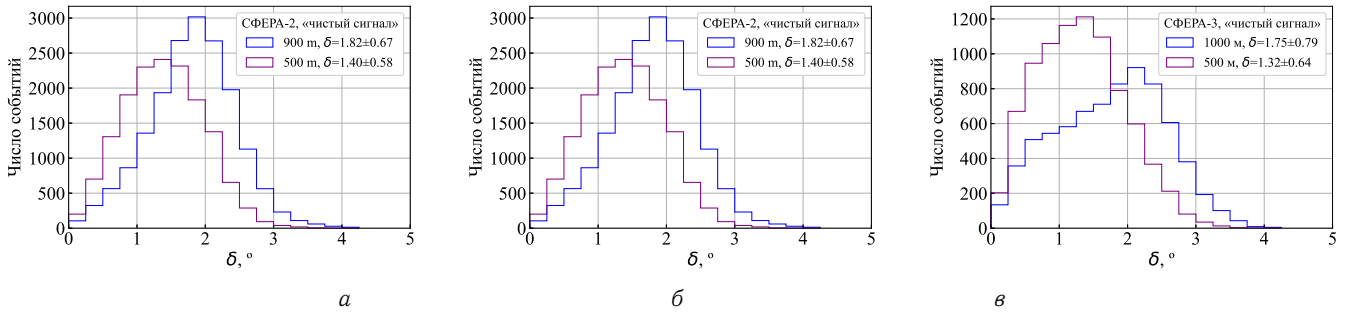


Рис. 5. Распределение ошибок по сумме трех ядер (p, N, Fe) для *a* — «чистого» и *б* — «электронного сигнала» телескопа СФЕРА-2; *в* — для «чистого сигнала» для телескопа СФЕРА-3

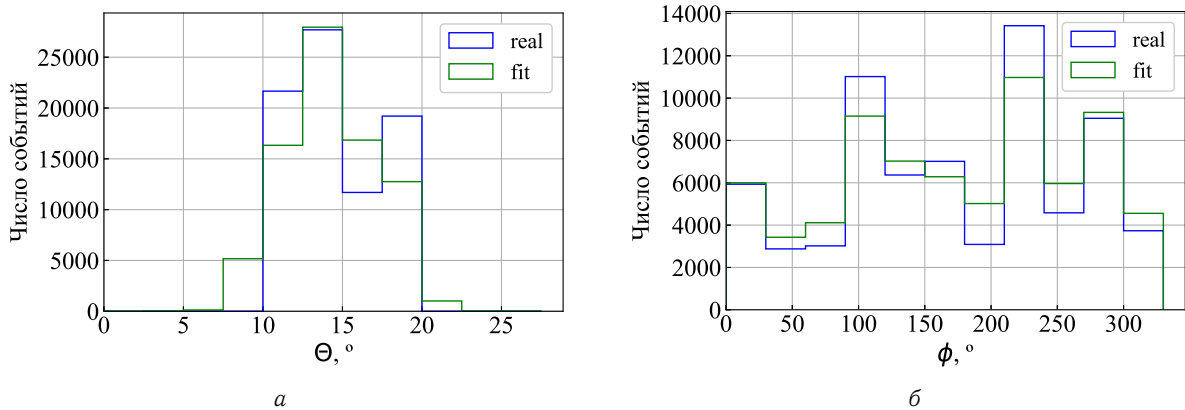


Рис. 6. Распределение восстановленных и истинных ϱ — θ зенитных и δ — ϕ азимутальных направлений для всех отобранных модельных событий

В качестве ошибки определения направления принимается угол δ между истинным направлением и оцененным направлением. Распределение ошибок определения направления приведено на рис. 5, где каждому распределению соответствует сумма ошибок по трем ядрам (p, N, Fe).

Для выборки чистого сигнала телескопа СФЕРА-2 получены ошибки определения направления в среднем для всех выборок $1.6 \pm 0.6^\circ$ (рис. 5, *a*). Этот показатель ухудшился на 15% при прохождении ливней через электронику, достигнув $1.9 \pm 1.1^\circ$ (рис. 5, *б*). Высота установки оказывает сильное влияние на точность: на высоте 900 м качество оценки направления уменьшилось практически на 30%, тогда как на 500 м — на 10% лучше по сравнению с 900 м. Для событий чистого сигнала СФЕРА-3 результаты на 5% лучше по отношению к чистому сигналу СФЕРА-2 (рис. 5, *в*). Форма распределения истинных зенитных (рис. 6, *a*) и азимутальных (рис. 6, *б*) направлений, приведенная по сумме всех выборок, совпадает.

Точность определения направления ухудшается по мере удаления оси ливня от оси телескопа, по мере уменьшения интенсивности сигнала и уменьшения числа измерительных каналов, поскольку меньше фотонов попадают на мозаику. С увеличением расстояния оси ливня от телескопа интенсивность сигнала пада-

ет, в связи с чем меньше фотоприемников используется в восстановлении фронта. Число отобранных измерительных каналов является основным индикатором качества оценки направления. Подобные зависимости наблюдаются как для чистого, так и для электронного сигнала. Для чистого сигнала СФЕРА-3 никаких зависимостей точности определения направления от параметров не наблюдается. Можно предположить, что для электронного сигнала точность определения направления будет также одинаковой, независимо от характеристик ливня. Для обоих телескопов с увеличением энергии и заряда ядра ошибки уменьшаются.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СОБЫТИЯ

Разработанный алгоритм применен к экспериментальным событиям, полученным телескопом СФЕРА-2 во время полетов над озером Байкала (456 м над уровнем моря) в 2012 и 2013 гг.

3.1. Отбор событий

В измерениях 2012 г. и 2013 г. телескопом СФЕРА-2 было зарегистрировано 7358 и 3801 событий соответ-

ственно. Половина из них соответствует калибровочным или сбойным событиям. Остальные ливни прошли отбор на основе сформулированных выше критериев. Подробная статистика отбора событий приведена в таблице 1.

Таблица 1. Статистика отброшенных и отобранных событий для 2012 и 2013 гг.

Год	2012	2013
Всего событий	7358	3801
Критерии	Отброшено	Отброшено
Сбойные или калибр.	3593	1918
Короткие	1297	695
Интенсивность	1132	271
Ось	493	401
Число каналов	83	19
a_2	627	292
Всего отобрано	133	205

В 2012 и 2013 гг. было зарегистрировано 823 события, ранее определенных как события от черенковского света ШАЛ [15]. Сформулированные выше критерии удовлетворяют 338 ливней (примерно 40%) для анализа.

Основная часть отобранных событий зарегистрированы на высоте 400 и 500–600 м, имеют короткую длину импульса (от 100 до 300 нс) и небольшую интенсивность с максимальной амплитудой в 5 раз выше стандартного отклонения фона. Больше половины отобранных алгоритмом ливней зарегистрированы при наклоне установки меньше 3° , и не превышает 7° (рис. 7) в крайнем случае, в связи с чем в расчете углов прихода ливня наклон не учитывается.

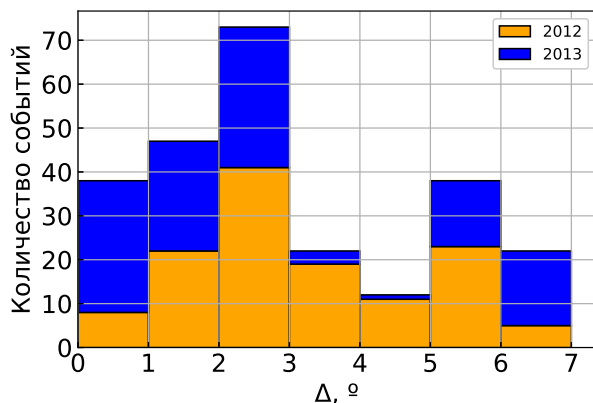


Рис. 7. Наклон установки для отобранных алгоритмом ливней

3.2. Направление прихода ШАЛ

Для отобранных событий проведено определение направления ШАЛ и получены параметры фронта a_0, a_1, a_2 . Средние значения параметров:

- $a_0 - 217.5 \pm 133.4$,
- $a_1 - -0.23 \pm 0.34$,
- $a_2 - (2 \pm 1) \times 10^{-3}$.

Параметр a_2 для экспериментальных событий оказался в несколько раз меньше по сравнению с модельными результатами. Это означает, что фронт экспериментальных событий, восстановленный этим методом, оказался более плоским. Возможно это обусловлено углом наклона установки.

По результатам обработки оказалось, что 90% всех зенитных углов распределены между 0 и 40° . Максимум распределения расположен вблизи 20° . Азимутальные направления имеют характерное практически равномерное распределение между 0 до 360° . Подобные результаты свидетельствуют о том, что разработанный алгоритм не применим к наклонным ливням из-за мало интенсивного сигнала. Распределения углов приведены на рис. 8.

Найдены зависимости разных параметров от зенитного направления. С увеличением наклона ливня увеличивается длина импульса, число отобранных измерительных каналов, параметр a_0 и уменьшается амплитуда суммарного сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлена поэтапная разработка алгоритма определения направления прихода широких атмосферных ливней, зарегистрированных по отраженному от снега черенковскому свету телескопами СФЕРА-2 и СФЕРА-3. Сформирован банк искусственных событий для двух телескопов. На основе модельных ливней реализована процедура выделения события черенковского света ШАЛ в отклике. В процессе разработки алгоритма сформированы критерии отбора ливней. Разработана процедура выделения сигнала в каждом измерительном канале и сформулированы критерии отбора каналов.

Ось ливня определяется в среднем с точностью от 5 до 12 м в зависимости от установки и высоты. Для телескопа СФЕРА-3 ось ливня определяется в два раза лучше, чем для СФЕРА-2.

Для телескопа СФЕРА-2 средние ошибки определения направления составляют $1.7 \pm 0.6^\circ$. Для событий чистого сигнала СФЕРА-3 результаты на 5% лучше по отношению к чистому сигналу СФЕРА-2. Определены параметры фронта a_0, a_1, a_2 для искусственных событий. Точность определения направления ухудшается по мере удаления оси ливня от оси телескопа по

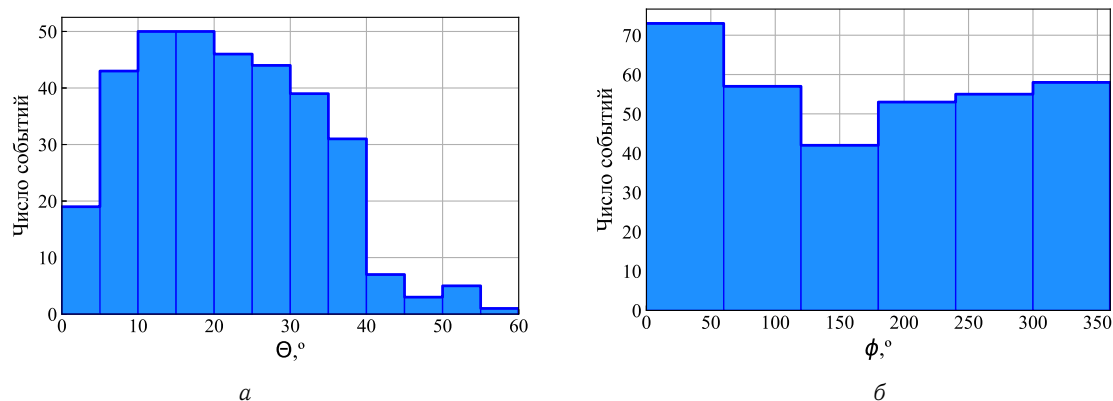


Рис. 8. Распределения *а* — зенитного угла и *б* — азимутального угла, полученные для отобранных экспериментальных событий телескопа СФЕРА-2 в 2012 и 2013 гг.

мере уменьшения интенсивности сигнала и уменьшения числа измерительных каналов, поскольку при этом меньше фотонов попадают на мозаику.

Разработанный алгоритм применен к экспериментальным событиям, полученным в 2012 и 2013 гг. установкой СФЕРА-2, однако не учитывался наклон установки. После применения критериев отбора ливней отобрано 338 событий — примерно 40% всех зарегистрированных событий ШАЛ. Основная часть отобранных ливней (~90%) имеет зенитные направления от 0 до 40° с максимумом распределения в районе 20°, то-

гда как азимутальные углы распределены равномерно. Если из экспериментальных событий отобрать только те, у которых углы наклона телескопа маленькие, то разработанный метод можно применить.

Метод нужно продолжать развивать для обработки экспериментальных событий и для новой разрабатываемой установки СФЕРА-3.

Расчёты образов для телескопа СФЕРА-3 выполнены при финансовой поддержке РФФ (грант № 23-72-00006).

-
- [1] Чудаков А.Е. Сборник Экспериментальные методы исследования космических лучей сверхвысоких энергий. Материалы Всесоюзн. симпозиума 19-23 июня 1972 г. **620**. 69 (1974).
- [2] Антонов Р.А., Петрова Е.А., Сысоева Т.И. и др. // Изв. РАН. **63**, № 3. 520 (1999).
- [3] Анохина А.М., Антонов Р.А., Бонвеч Е.А. и др. // Изв. РАН. **71**, № 4. 524 (2007). (Anokhina A.M., Antonov R.A., Bonvech E.A. et al. // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. (2007). **71**. № 4. 506).
- [4] Анохина А.М., Антонов Р.А., Бонвеч Е.А. и др. // Краткие сообщения по физике. **36**, № 5. 32 (2009). (Anokhina A.M., Antonov R.A., Bonvech E.A. et al. // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. **36**, N 5. 146 (2009)).
- [5] Чернов Д.В., Антонов Р.А., Аулова Т.В. и др. // Изв. РАН. **79**. 392 (2015). (Chernov D.V., Antonov R.A., Aulova T.V. et al. // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. **79**. 359 (2015)).
- [6] Чернов Д.В., Азра К.Ж., Бонвеч Е.А. и др. // Ядерная физика. **85**, № 6. 435 (2022). (Chernov D.V., Azra C., Bonvech E.A. et al. // *Physics of Atomic Nuclei*. **85**, N 6. 641 (2022)).
- [7] Латыпова В.С., Галкин В.И. // Ученые записки физического ф-та. Московского ун-та. № 4. 2341604. (2023).
- [8] Latypova V., Azra C., Bonvech E. et al. // *Proceedings of Science*. **423**, N ECRS, 069. 1 (2023)
- [9] Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N. et al. // Feb. FZKA-6019. (1998).
- [10] Apostolakis J., Asai M., Bogdanov A.G. et al. // *Radiation Physics and Chemistry*. **78**. 859 (2009).
- [11] Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. **506**. 250 (2003).
- [12] Allison J., Amako K., Apostolakis J. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. **835**. 186 (2016).
- [13] Азра К.Ж., Галкин В.И. // Ученые записки физического ф-та. Московского ун-та. № 4. 2341602 (2023).
- [14] James, F. // CERN-D-506. (1994).
- [15] Antonov R.A., Beschapov S.P., Bonvech E.A. et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. **409**. 1 (2012).

Reconstruction of the arrival direction of EASs using Cherenkov light reflected from snow**С. Г. Азра^{1,a}, Е. А. Бонвеч^{2,b}**¹*Department of Space Physics Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*²*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119191, Russia**E-mail: ^aclemenceanastasia@gmail.com, ^bbonvech@yandex.ru*

The reconstruction of the arrival direction of extensive air showers (EAS) is an important part of the data analysis methodology in the SPHERE experiment. Knowledge is necessary to construct an optimal criterion for nuclei separation, used to determine the mass composition of primary cosmic rays (PCR). This work presents a step-by-step development of the algorithm to determine the arrival direction of air showers for the SPHERE-2 and SPHERE-3 telescopes, based on parabolic approximation of the front. It is being developed and tested on the basis of artificial EAS events. The algorithm was applied to experimental events registered in 2012 and 2013 by the SPHERE-2 telescope.

PACS: 96.50.sb, 96.50.sd

Keywords: extensive air showers, Cherenkov light, Monte Carlo simulation, approximation.*Received 09 June 2024.***Сведения об авторах**

1. Азра Клеманс Жоржевна — студентка; тел.: (495) 939-36-06, e-mail: clemenceanastasia@gmail.com.
2. Бонвеч Елена Алексеевна — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник НИИЯФ МГУ; тел.: (495) 939-58-73, e-mail: bonvech@yandex.ru.