

УДК 537.591.15

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ХИМИЧЕСКОМУ СОСТАВУ ПКЛ ПО ДАННЫМ УСТАНОВКИ СФЕРА-2

© 2015 г. Д. В. Чернов¹, Р. А. Антонов¹, Т. В. Аулова¹, С. П. Бешапов⁴, Е. А. Бонвеч¹,
В. И. Галкин², Т. А. Джатдоев¹, А. С. Петкун⁴, Д. А. Подгрудков², Т. М. Роганова¹,
Т. И. Сысоева⁴, Мир. Фингер³, Мих. Фингер³, С. Б. Шаулов⁴

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

Представлен новый метод оценки типа частиц первичных космических лучей в области энергий 10–1000 ПэВ для индивидуальных событий, зарегистрированных установкой СФЕРА-2. Метод основан на сравнении образов зарегистрированных событий с моделированными событиями в предположении различных типов первичной частицы с учетом погрешностей измерения. Исследование направлено на поиск предела чувствительности в определении химического состава первичных космических лучей сверхвысоких энергий при использовании метода регистрации отраженного черенковского света широких атмосферных ливней.

DOI: 10.7868/S036767651503014X

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время состав космических лучей (КЛ) в области энергий выше “колена” около 3 ПэВ в энергетическом спектре первичных КЛ (ПКЛ) является широко обсуждаемой проблемой в области изучения КЛ сверхвысоких энергий. В первую очередь это связано с серией публикаций последних результатов обработки экспериментальных данных установки “KASCADE-Grande” [1]. В статье [2] на рисунке 11 приведен рост доли тяжелой компоненты космических лучей в диапазоне энергий от 2 до 20 ПэВ по данным установки “KASCADE”. В этом же диапазоне энергий показано уменьшение доли легкой компоненты. Выше 20 ПэВ доля тяжелой компоненты достигает значений 50% и более. Похожий результат приведен в статье [3] по результатам эксперимента “Тунка-133”. Данные этих двух статей качественно согласуются друг с другом, несмотря на то что в этих экспериментах применяются разные чувствительные к составу ПКЛ параметры.

Между тем в другой статье коллаборации “KASCADE-Grande” [4] указывается на высокую чувствительность применяемого метода к модели

адронного взаимодействия. Указанная выше особенность в спектре тяжелой компоненты получается при расчетах с использованием модели QGSJET-II-02. Результаты согласуются при использовании модели SIBYLL 2.1, но резко расходятся с моделью EPOS 1.99, поскольку в последнем случае доля легкой компоненты в несколько раз превышает значение тяжелой. Причина заключается в систематическом сдвиге экспериментальных данных при восстановлении состава с использованием EPOS 1.99. В такой ситуации появляются сомнения в правильности выбора той или иной модели при восстановлении состава ПКЛ из экспериментальных данных и достоверности получаемых результатов. Данная работа посвящена поиску методики для разрешения указанной выше проблемы. Тестирование методики выполняется с использованием экспериментальных данных установки СФЕРА-2.

УСТАНОВКА СФЕРА-2

Уникальная мобильная астрофизическая обсерватория СФЕРА [5], предназначенная для исследования первичного космического излучения в интервале энергий 10–1000 ПэВ путем регистрации широких атмосферных ливней новым методом, была разработана и создана силами НИИЯФ МГУ и ФИАН при поддержке РФФИ и Российской академии наук. Установка поднимается на привязном аэростате ночью в безлунное и безоблачное время над покрытой снегом поверхностью озера Байкал на высоту до 1 км и регистрирует отраженный от снежной поверхности черенковский свет ШАЛ (рис. 1а).

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова” Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобелыцина.

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, Физический факультет.

³ Карлов Университет, Прага, Чехия.

⁴ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва.

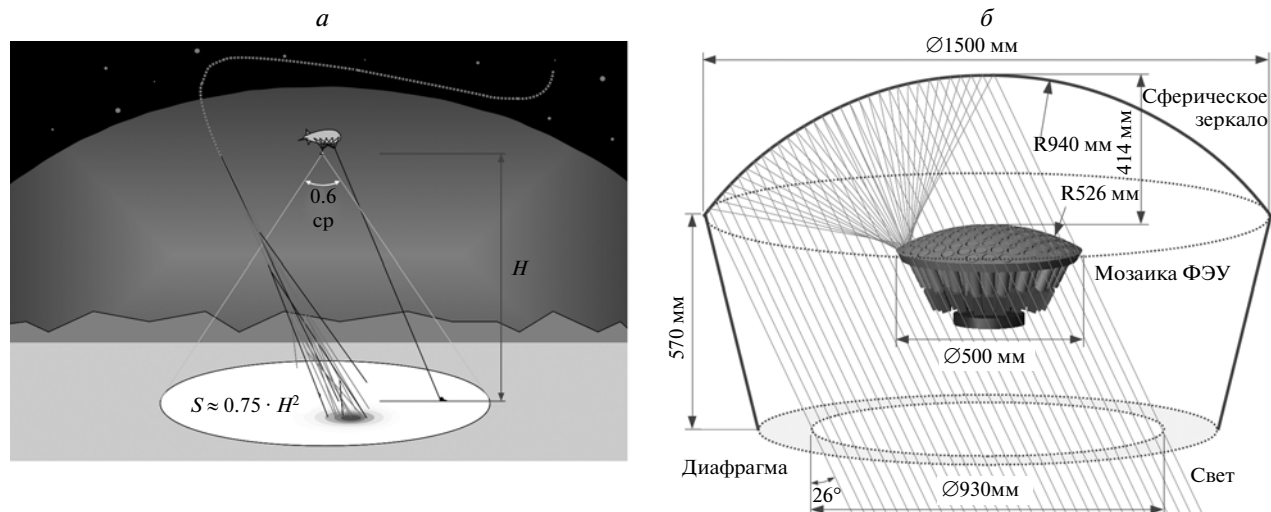


Рис. 1. *а* — Схема эксперимента с установкой СФЕРА-2 на ледовой поверхности озера Байкал; *б* — Оптическая схема установки СФЕРА-2.

В состав мобильной обсерватории входит аэростатная установка СФЕРА-2, основной частью которой является сферическое зеркало диаметром 1.5 м с мозаикой из 109 ФЭУ-84-3 в фокусе (рис. 1б) и электроникой, регистрирующей анодный сигнал каждого ФЭУ с шагом 12.5 нс. Применение корректирующей диафрагмы Шмидта обеспечивает угол обзора 0.6 ср.

Установка эксплуатировалась в период с 2008 по 2013 годы. Основные данные были получены в ходе измерений 2011–2013 годов. Было восстановлено более 1000 событий от ШАЛ и построен энергетический спектр, приведенный на рис. 2.

МЕТОДИКА

Для решения указанной во введении проблемы предлагается использовать методику сравнения “образов” реальных экспериментальных событий с рассчитанными “образами” событий ШАЛ. Образ события представляет собой цифровые данные — отклик электронной системы регистрации установки СФЕРА-2 на событие от ШАЛ.

В экспериментальные данные вводятся калибровочные поправки, учитывающие различие чувствительности отдельных ФЭУ. Для любых двух ФЭУ в мозаике установки СФЕРА-2 погрешность определения относительной чувствительности составляет 3%. Абсолютная чувствительность для любого ФЭУ определяется с учетом относительной чувствительности с погрешностью не более 5%. Высокая точность определения абсолютной чувствительности достигается за счет применения калиброванного источника света L11494-430 с максимумом излучения в области 430 нм. Относительная калибровка проводится непосредственно во время измерений путем освещения

всей мозаики ФЭУ семью светодиодами через 6 мкс после каждого зарегистрированного события. Таким образом контролируется чувствительность каждого ФЭУ.

После учета всех калибровочных поправок данные “образа” представляются в виде графика (рис. 3 слева). На графике по горизонтальной оси отложены номера ФЭУ в мозаике последовательно в порядке возрастания номера [6]. По вертикальной оси отложены номера отсчетов времени измерения амплитуды сигнала. Интервал между отсчетами времени соответствует 12.5 нс.

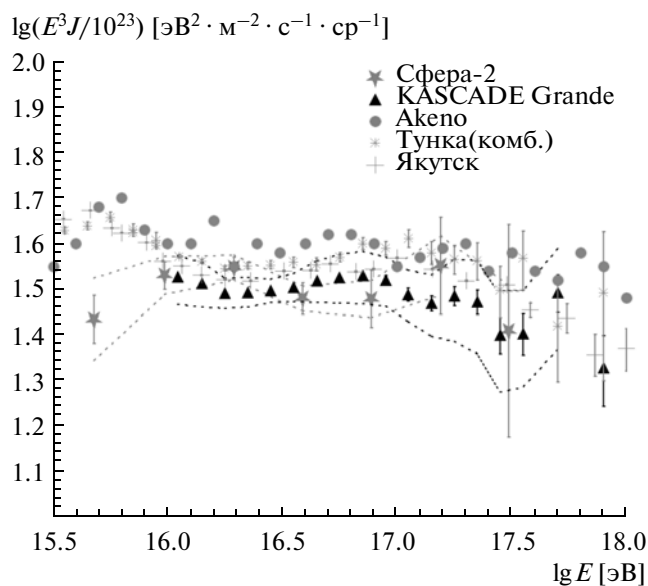


Рис. 2. Дифференциальный энергетический спектр по данным 2011–2013 годов.

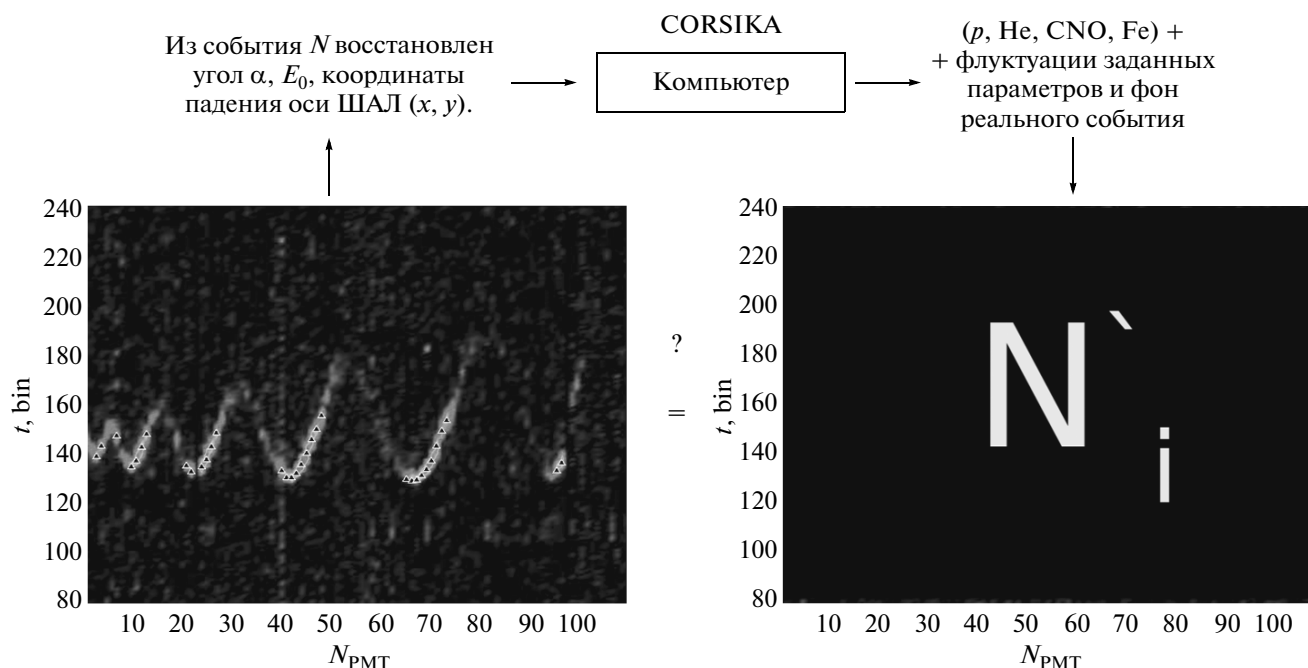


Рис. 3. Принцип работы метода.

По времени прихода сигнала от ЧС ШАЛ на разные ФЭУ установки восстанавливается угол наклона оси ШАЛ. По распределению света на мозаике ФЭУ определяется ось ливня, а по суммарному количеству света — энергия первичной частицы. С помощью программы CORSIKA и программы расчета “отклика” детектора моделируются события с аналогичными параметрами ливня. В качестве первичных частиц в процедуру моделирования закладываются четыре типа первичных частиц: протоны, ядра гелия, азота и железа. Для каждого типа частиц разыгрывается набор из не менее чем ста событий с учетом флуктуаций найденных ранее параметров: первичной энергии, угла наклона и координат оси ШАЛ, а также флуктуаций развития каскада (рис. 3 справа). Таким образом получается набор образов, “похожих” на исходное экспериментальное событие, которые можно сравнивать с ним. После проведения сравнения событию приписывается тот или иной тип первичной частицы с уточненными параметрами ШАЛ. Поскольку в данном методе не используются усредненные параметры формы (наклона) ФПР ЧС ШАЛ, остаются только два фактора, ухудшающие восстановление типа ПКЛ: аппаратная точность измерений и флуктуации светового фона, поэтому данный метод наиболее достоверен для анализа экспериментальных данных установки СФЕРА-2.

Предложенный метод можно использовать также для тестирования различных моделей первого взаимодействия. Тогда, возможно, будет найдено решение проблемы неоднозначности в определении состава ПКЛ, изложенной во введении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокая точность регистрации ЧС ШАЛ в эксперименте с установкой СФЕРА-2 достигается за счет применения разработанной системы калибровки. Полученные результаты позволяют осуществить анализ состава ПКЛ по плотности ЧС в приосевой области ШАЛ. Предложен метод определения состава ПКЛ на основе сравнения образов зарегистрированных событий с моделированными событиями.

Работа поддержана российским Фондом фундаментальных исследований (грант № 13-02-00470-а) и Программой фундаментальных исследований Президиума РАН “Фундаментальные свойства материи и астрофизика”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Apel W.D., Arteaga-Velázquez J.C. et al.* // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. Sec. A. 2010. V. 620. Iss. 2–3. P. 202. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2010.03.147>.
2. *Apel W.D., Arteaga-Velázquez J.C. et al.* // Astropart. Phys. 2013. V. 47. P. 54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2013.06.004>.
3. *Prosin V.V., Berezhnev S.F. et al.* // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 2014. V. 756. P. 94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2013.09.018>.
4. *Apel W.D., Arteaga-Velázquez J.C. et al.* // Adv. Space Res. 2014. V. 53. № 10. P. 1456.
5. *Анохина А.М., Антонов Р.А., Бонвеч Е.А. и др.* // Краткие сообщения по физике. 2009. Т. 36. № 5. С. 32.
6. *Antonov R., Beschapov S., Bonvech E. et al.* // J. Phys. 2013. V. 409. № 1. 012094.