

УДК 524.1

ПРОТОТИП УСТАНОВКИ СФЕРА-АНТАРКТИДА И ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ФЭУ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЧЕРЕНКОВСКОГО И ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО СВЕТА ШАЛ

© 2017 г. Д. В. Чернов^{1, *}, Р. А. Антонов¹, Е. А. Бонвеч¹, Г. К. Гарипов¹, В. И. Галкин^{1, 2}, Д. А. Подгрудков^{1, 2}, Т. М. Роганова¹, Мир. Фингер³, Мих. Фингер³

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцина

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

³Карлов университет, Прага, Чехия

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

Приведено описание разрабатываемого аэростатного прибора для проведения исследования энергетического спектра и массового состава первичных космических лучей в области энергий выше 10^{18} эВ. Исследование планируется провести в период Антарктической полярной ночи. Аппаратура позволяет регистрировать в каждом событии отдельно флуоресцентный свет (ФС) и излучение Вавилова–Черенкова (ЧС). Рассмотрены преимущества эксперимента по сравнению с существующими наземными установками и проектируемыми орбитальными. Описана методика сепарации ЧС и ФС при помощи светофильтров с применением оптических кремниевых детекторов.

DOI: 10.7868/S0367676517040123

ВВЕДЕНИЕ

Проблема определения основных характеристик — энергетического спектра и массового состава — частиц первичных космических лучей (ПКЛ) в области высоких и сверхвысоких энергий чрезвычайно актуальна. Область сверхвысоких энергий 10^{18} – 10^{20} эВ представляет особый интерес с точки зрения изучения механизмов ускорения частиц в источниках как в нашей Галактике, так и за ее пределами. Исследования нерегулярностей формы энергетического спектра и особенностей массового состава космических лучей могут дать сведения о роли внегалактической компоненты ПКЛ. В последнее десятилетие было выполнено несколько масштабных экспериментов (Telescope Array [1], Pierre Auger Observatory [2], Якутск [3]), однако проблема все еще не решена. Это, безусловно, связано со сложностью проблемы, сложностью используемых экспериментальных методов, методические погрешности которых часто бывает трудно оценить, а также недостатком статистики, особенно в области сверхвысоких энергий. В этой области энергий ускорительная информация о характеристиках взаимодействия также отсутствует.

В области энергий выше $6 \cdot 10^{19}$ эВ современные эксперименты наблюдают анизотропию и группирование направлений прихода космических лучей около некоторых направлений [4, 5]. Научный интерес к этой проблеме обусловлен отсутствием общепринятого механизма ускорения частиц ПКЛ выше $3 \cdot 10^{18}$ эВ, неизвестной природой источников таких частиц, расхождением результатов измерения спектра ПКЛ выше $5 \cdot 10^{19}$ эВ крупных экспериментов [6] и расхождением экспериментальных и модельных данных [7].

ПРОЕКТ СФЕРА-АНТАРКТИДА

Для продвижения в решении обозначенных во введении проблем планируется осуществить проект Сфера-Антарктида [8]. Схема предлагаемого эксперимента представлена на рис. 1, а сравнение с некоторыми существующими установками в табл. 1. Установка будет регистрировать как флуоресцентный трек от широких атмосферных ливней (ШАЛ) в атмосфере, так и измерять полный интеграл черенковского света ЧС ШАЛ, являющийся наиболее точной и наименее зависящей от модели развития ШАЛ мерой энергии первичной частицы. В настоящее время не существует уста-

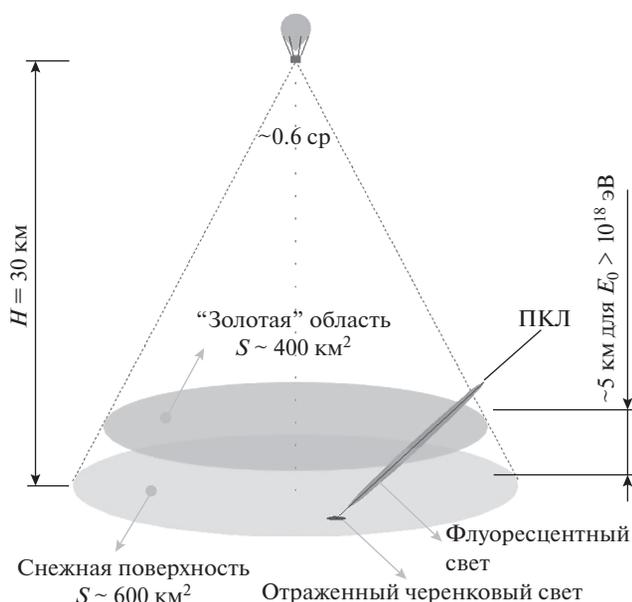


Рис. 1. Схема эксперимента в Антарктиде. Установка Сфера-Антарктида и ее Прототип имеют схожие геометрические параметры, но разную чувствительность и оптическое разрешение (приблизительно в 10 раз). События из области “золотая” содержат информацию об интенсивности как ЧС, так и ФС одновременно.

новок, способных регистрировать полный поток ЧС от ШАЛ в указанном диапазоне энергий.

Исследование энергетического спектра и массового состава космических лучей в области 10^{18} – 10^{20} эВ методом регистрации отраженного ЧС и ФС от ШАЛ планируется проводить в условиях полярной антарктической ночи с помощью аэростатной установки Сфера-А на высоте около 30 км. Геометрический фактор установки для ЧС составит $A_{\text{ЧС}} \sim 1300 \text{ км}^2 \cdot \text{ср}$, а при совместной регистрации ЧС и ФС – $A_{\text{“ЧС+ФС”}} \sim 15\text{--}30\% A_{\text{ЧС}}$ в зависимости от энергии первичной частицы, когда регистрируется не менее 50% трека ФС.

Проект рассчитан на несколько этапов реализации. На первом этапе будет произведен запуск

зонда-трекера для определения возможной траектории движения установки и измерения фоновой засветки. Затем будут проведены тестовые измерения с Прототипом установки. После этого станет возможно проведение измерений с экспериментальной установкой Сфера-А. И, наконец, регулярные измерения с использованием нескольких установок в течение 3–10 лет. В данной статье описывается второй этап осуществления проекта: Прототип установки Сфера-А.

ЗАДАЧИ ПРОТОТИПА

Основными задачами Прототипа являются: экспериментальная апробация инженерных и технических решений в конструкции аппаратуры, проведение методических измерений с целью регистрации нескольких десятков событий от ШАЛ, тестирование процедуры восстановления характеристик ШАЛ и ПКЛ по данным зарегистрированных событий, экспериментальное определение энергетического порога и сравнение с данными моделирования.

Прототип совершит 30-суточный полет над Антарктидой на высоте 30 км в условиях полярной ночи. За это время может быть зарегистрировано до 130 событий от ШАЛ с энергией выше энергетического порога установки $5 \cdot 10^{18}$ эВ. Расчеты проведены в предположении: обозреваемая поверхность – 600 км^2 , телесный угол наблюдения событий – 4 ср, коэффициенты эффективности использования времени наблюдения – 0.5 из-за наличия Луны и 0.9 из-за облачной погоды.

Для эксперимента с Прототипом создается аэростатная установка, предназначенная для регистрации как флуоресцентного света ШАЛ, так и потока отраженного от снежной поверхности черенковского света ШАЛ при энергиях $5 \cdot 10^{18}$ – $5 \cdot 10^{19}$ эВ. В эксперименте будет использована самая современная аппаратура небольшой массы и размера, способная в период полярной ночи находиться на высоте от 25 до 35 км над покрытой льдом и снегом поверхностью Антарктиды.

Таблица 1. Сравнение некоторых современных экспериментов

Установки	Методики			
	частицы ШАЛ	черенковский свет	флуоресцентный свет	расположение
AUGER (PAO)	X		X	Южное полушарие
Telescope Array (TA)	X		X	Северное полушарие
Якутская установка	X	X		Северное полушарие
Сфера-А		X	X	Южное полушарие
JEM-EUSO (K-EUSO)		?	X	Северное и южное полушария

АППАРАТУРА ПРОТОТИПА

Некоторые технические характеристики Прототипа приведены в табл. 2.

Оптическая система Прототипа состоит из системы линз с коррекцией сферической аберрации с диаметром входного окна 160 мм и полным углом обзора ~0.6 ср (не путать с углом наблюдения событий от ШАЛ 4 ср). Свет оптических компонент ШАЛ фокусируется на матрицу из 256 кремниевых фотоумножителей (SiPM) MicroFJ 60035 Series [9]. Размер каждого элемента матрицы 6 × 6 мм. Квантовая эффективность фотокатода в максимуме его чувствительности при длине волны 420 нм составляет 40–50%. При сравнимой с обычными ФЭУ квантовой чувствительностью SiPM имеют меньшие габариты, массу и не требуют применения высоковольтного напряжения для питания. Относительно высокий темновой ток SiPM в стандартных лабораторных условиях значительно уменьшается в условиях проведения измерений при низких температурах на высоте ~30 км.

Все элементы SiPM имеют дифференцирующий “быстрый выход”, который позволяет использовать данные SiPM в режиме счета фотоэлектронов. Данный режим включения дает возможность отказаться от применения сложных и энергозатратных аналого-цифровых преобразователей. Схема измерительного канала реализуется на базе микросхемы программируемой логики. Проверка наличия фотоэлектрона на входе канала происходит каждые 5 нс. Такой шаг проверки исключает возможность “просчета” или двойного учета фотоэлектрона, так как длительность сигнала SiPM на половине амплитуды также составляет 5 нс.

Плата триггера позволяет отбирать события из светового фона и вырабатывать номер события для последующего формирования “кадра события” из файлов данных. Триггер реализуется на базе одной микросхемы программируемой логики с 256 входами. Алгоритм программы позволяет вырабатывать триггерный сигнал, когда 2, 3 или 4 расположенные рядом ячейки выдают запрос на выработку сигнала подтверждения триггера.

Для стратосферных детекторов и установок аэрокосмического базирования погрешность в измерении вносит рассеянный в атмосфере ЧС от ШАЛ, поэтому задача надежного разделения черенковского и флуоресцентного излучений в атмосфере крайне важна для повышения точности экспериментов в области изучения космических лучей сверхвысоких и предельно высоких энергий. Влияние рассеянного ЧС на результаты измерений ФС было отмечено в проекте JEM-EUSO [10]. Для учета влияния этого эффекта будет использована методика для сепарации ЧС и ФС от ШАЛ. Основная идея методики основана на воз-

Таблица 2. Характеристики Прототипа

Габаритные свойства	
Диаметр диафрагмы	160 мм
Площадь входного окна	0.02 м ²
Масса аппаратуры	до 10 кг
Детектор и электронная аппаратура	
Каналов SiPM (6 × 6 мм) в мозаике	256 шт.
Лазерный лидар	0.3 Вт, 405 нм
Система позиционирования	GPS/ГЛОНАСС
Спутниковая система связи	Iridium или Гонец

можности одновременной регистрации света двумя или более фотоприемниками, на один из которых свет попадает непосредственно с собирающей линзы, а на другой приходит через оптический фильтр. Фильтр устанавливается непосредственно на каждый второй фотоприемник. Зная характеристики чувствительности фотоприемников, характеристики поглощения фильтрующих элементов и спектры черенковского и флуоресцентного излучений, можно рассчитать долю каждой компоненты в общем световом потоке. Например, фильтр УФС-1 пропускает до 80% ФС в области 250–370 нм (см. рис. 2), но отсекает (>90%) “хвост” распределения ЧС в области 420–650 нм. Близкие характеристики имеют фильтры УФС-5 и ФС6 (аналог BG3). Другими словами, метод основан на том, что спектр излучения ЧС шире спектра ФС, а правильно подобранный фильтр позволяет выделять компоненты.

Калибровку светочувствительного детектора установки планируется осуществлять непосред-

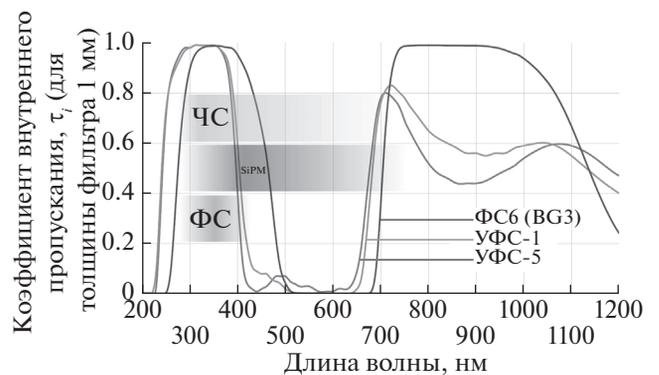


Рис. 2. Спектральные характеристики светофильтров ФС6 (BG3), УФС-1, УФС-5. Горизонтальными полосами показаны спектральные области излучения ЧС и ФС, а также область чувствительности SiPM. Более темные области полос показывают максимумы излучения (чувствительности).

ственно в полете с использованием лазерного луча, т.е. лазерного лидара. Лидар состоит из блока управления, механической системы углового позиционирования и полупроводникового лазерного диода FVLD-300S-405. Диод имеет длину волны излучения 405 нм и мощность оптического излучения 0.3 Вт, что соответствует $\approx 9 \cdot 10^{-19}$ Дж/фотон и $\approx 3.5 \cdot 10^{17}$ фотонов в секунду. Для надежного выделения отраженного света длительность лазерного импульса, направленного на поверхность земли, должна быть около 1 мс, что соответствует $\approx 9 \cdot 10^{14}$ фотонов. Количество фотонов альбедо от снега составит ≈ 1000 , что соответствует ~ 400 фотоэлектронам при высоте установки 30 км, коэффициенте отражения снега 0.9 и с учетом косинуса угла прихода света на детектор. За 1 мс флуктуация фона в ячейке составит 100 фотонов или ≈ 40 фотоэлектрона. При этом отношение сигнал/фон будет около 10. Точность калибровки может быть увеличена за счет повторения процедуры.

Для определения местоположения измерительной аппаратуры используются стандартный модуль GPS/ГЛОНАСС приемника. Модуль выдает географические координаты и высоту детектора.

Для приема команд и передачи данных измерений будут использованы спутниковые системы связи Iridium [11] или Гонец [12]. Основными факторами в выборе спутниковой системы для передачи данных являются зона покрытия Антарктиды и ограничение на потребляемую мощность приемопередающей аппаратуры.

Поскольку полет осуществляется в условиях полярной ночи, использовать солнечные батареи невозможно. Питание электроники осуществляется с помощью литиевых элементов. Элементы Li/SOCl₂ обеспечивают удельную энергию до 600 Вт · ч · кг⁻¹. Серийно выпускаемые стандартные элементы питания предназначены для эксплуатации в диапазоне температур от -60°C .

Для подъема Прототипа будет использован стратосферный аэростат. Ориентировочный объем оболочки аэростата для Прототипа составит 2000–3000 м³ с начальным объемом 20–30 м³ на уровне моря. Запуск оболочек малого объема не требует наличия значительной инфраструктуры. В качестве примера использования малых аэростатов можно представить аэростатный эксперимент BARREL [13]. Запуск оболочки осуществляется буквально с рук, наполненную гелием оболочку легко удерживают два человека.

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА В АНТАРКТИДЕ

По данным многолетних метеорологических наблюдений в период с мая по сентябрь в Антарктиде облачность составляет 0–10% в приполяр-

ных областях и до 40–50% на широтах около 70 градусов. Проведение измерений в отсутствие облачности наиболее предпочтительно. Однако при средних температурах в приполярных областях до -60°C осуществить какие-либо работы невозможно, поэтому запуски планируется проводить с береговых Российских Антарктических станций “Новолазаревская” и “Прогресс”, где средние температуры в июне и июле находятся в пределах от -15 до -20°C . В этот период преобладают сильные ветры, но, как правило, один раз в месяц на несколько дней ветер стихает до $1-2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. В таких условиях возможно проведение стартов для малых воздушных аппаратов с временем полного цикла развертывания и запуска менее 12 часов.

В период с июня по август над полярной областью Антарктиды устанавливается устойчивый циклон [14]. На высотах около 30 км образуется область низкого давления, которая формирует устойчивую воздушную “воронку” вблизи южного полюса. Согласно многолетним метеоданным, запущенные с прибрежных станций аэростаты дрейфуют в полярных областях Антарктиды на высотах от 15 до 30 км. На более низких высотах преобладают турбулентности и центробежные потоки. Температура на высотах около 30 км варьируется от -15 до -80°C . Давление на высотах 25–30 км составляет около 10 гПа (0.01 атм). Скорость движения воздушных потоков изменяется в пределах от 0 до $470 \text{ км} \cdot \text{ч}^{-1}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве начального этапа реализации проекта Сфера-Антарктида планируется проведение измерений с Прототипом установки Сфера-А. Основными преимуществами предлагаемой методики являются возможность одновременного измерения ФС и отраженного ЧС ШАЛ, возможность осуществлять многократные запуски, простота и низкая стоимость реализации проекта. Проведение измерений в Антарктиде позволяет наблюдать за источниками ПКЛ южного полушария небесной сферы, обеспечивает высокий КПД по времени экспозиции при измерениях в период полярной ночи, высокую точность измерения интенсивности ЧС и ФС за счет чистой атмосферы. Наличие готовой инфраструктуры и логистики для доставки оборудования на полярные станции РФ существенно упрощает организацию экспедиций.

Часть опубликованных в статье материалов подготовлена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 16-02-00777.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://www.telescopearray.org/>.
2. <https://www.auger.org/>.

3. <http://eas.ysn.ru/>.
4. *Abbasi R.U. et al. Telescope Array Collaboration // Astrophys. J.* 2015. V. 804. P. 133. [arXiv:1407.6145]
5. *The Pierre Auger Collaboration // Astrophys. J.* 2015. V. 804. P. 15. 10.1088/0004-637X/804/1/15arXiv:1411.6111.
6. *The Pierre Auger Collaboration // JCAP* 08. 2015. V. 2015. P. 49. arXiv:1503.07786, doi 10.1088/1475-7516/2015/08/049
7. *The Pierre Auger Collaboration // Phys. Rev. D.* 2015. V. 91. 032003. 10.1103/PhysRevD.91.032003arXiv:1408.1421.
8. *Антонов Р.А., Стожков Ю.И., Чернов Д.В. // Краткие сообщения по физике.* 2016. Т. 43. № 2. С. 48. <http://istina.msu.ru/media/publications/article/644/e80/21017960/71323983.pdf>.
9. <http://sensl.com/products/j-series/>.
10. *Andreas H. et al. JEM-EUSO Collaboration // J. Phys. Conf. Ser.* 2015. V. 632. 012092. 10.1088/1742-6596/632/1/012092arXiv:1504.02593.
11. <http://www.iridium.com>.
12. <http://www.gonets.ru>.
13. *Halford A.J., McGregor S.L., Murphy K.R. et al. // J. Geophys. Res. Space Physics.* 2015. V. 120. P. 2557. 10.1002/2014JA020873, <http://www.dartmouth.edu/~barrel/>.
14. <http://earth.nullschool.net/#2015/08/15/0900Zwind/isobaric/10hPa/orthographic=30,-90,360>.