

УДК 533.932

**ИЗУЧЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА  
И МАССОВОГО СОСТАВА ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ  
ЛУЧЕЙ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ  $10^{18}$ – $10^{20}$  ЭВ С ПОМОЩЬЮ  
АЭРОСТАТНОЙ УСТАНОВКИ В АНТАРКТИДЕ  
(ПРОЕКТ СФЕРА–АНТАРКТИДА)**

Р. А. Антонов<sup>1</sup>, Д. В. Чернов<sup>1</sup>, Ю. И. Стожков<sup>2</sup>

*Предложен антарктический баллонный эксперимент по измерению энергетического спектра и элементного состава космических лучей в области сверхвысоких энергий ( $10^{18}$ – $10^{20}$ ) эВ. Научная аппаратура будет измерять флуоресцентное свечение, вызываемое широким атмосферным ливнем, образованным в атмосфере частицей сверхвысокой энергии, а также черенковский свет этого ливня, отраженный от снежной поверхности. Предполагается, что баллон будет летать по циркумполярной орбите в Антарктиде на высоте  $\sim 25$  км в течение (2–3) зимних (в южном полушарии) месяцев. За это время будет зарегистрировано  $\sim 3000$  событий, вызванных частицами с энергиями более  $10^{18}$  эВ, и (200–300) событий, вызванных частицами с энергиями более  $10^{19}$  эВ.*

**Ключевые слова:** космические лучи, флуоресцентный и черенковский свет, энергетические спектры, аэростат.

В настоящее время в области энергий первичных космических лучей (ПКЛ) 1–100 ЕэВ работает несколько больших наземных экспериментальных установок, регистрирующих широкие атмосферные ливни (ШАЛ) [1–5]. Однако результаты их измерений недостаточно хорошо согласуются друг с другом из-за принципиальных недостатков используемой в этих экспериментах методики.

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. И. Ломоносова, Москва.

<sup>2</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: stozkov@fian.fiandns.mipt.ru.

В области энергий  $10^{18} - 10^{20}$  эВ максимум развития ШАЛ находится вблизи уровня моря, поэтому изучать его развитие с помощью наземных установок трудно. Геометрия предлагаемого аэростатного эксперимента дает возможность исследовать характеристики ШАЛ в этой экстремальной области энергий с гораздо большей точностью.

Наилучшим методом изучения энергетического спектра в этой области энергий является калориметрический метод регистрации интегрального потока черенковского света ШАЛ, предложенный А. Е. Чудаковым [6]. Ни в одной экспериментальной установке в настоящее время в этой области энергий он не используется.

Второй, также предложенный А. Е. Чудаковым, квазикалориметрический метод регистрации флуоресцентного света ШАЛ [7] также не может быть в достаточной мере использован в существующих установках.

В данной работе предлагается новый вариант аэростатной установки небольшого размера и веса, способной в период полярной ночи в течение одного-трех месяцев находиться на высоте  $\sim 25$  км над покрытой льдом и снегом поверхностью Антарктиды и регистрировать как флуоресцентный свет ШАЛ, так и полный поток отраженного от снежной поверхности черенковского света ШАЛ.

В последние годы в период антарктического лета над Антарктидой проводились длительные полёты с научной аппаратурой вплоть до 46-дневных. Во время антарктической зимы (с мая по сентябрь) вокруг Антарктиды создаётся большой ледовый пояс, покрытый снегом так, что форма береговой линии материка становится близкой в круговой. Это должно способствовать формированию более устойчивых круговых циркумполярных воздушных течений. Это может дать возможность осуществлять ещё более длительные полёты.

Поиск наиболее подходящих траекторий полёта будет произведен на первом подготовительном этапе проведения эксперимента.

Предложенный метод позволяет получить информацию о развитии ливня в атмосфере, определить глубину максимума развития ШАЛ и зенитный угол наклона оси ШАЛ. Эти данные позволяют анализировать массовый состав и энергетический спектр ПКЛ.

*1. Цель проекта.* Целью проекта СФЕРА–Антарктида является изучение энергетического спектра и элементного состава первичных космических лучей (ПКЛ) в области энергий  $10^{18} - 10^{20}$  эВ. Эта область энергий представляет особый интерес с точки зрения изучения механизмов ускорения частиц в источниках как в нашей Галактике, так и за её пределами. Нерегулярности формы энергетического спектра и измерения массового

состава могут дать сведения о роли внегалактической компоненты ПКЛ и том, имеет ли место эффект Грейзена–Зацепина–Кузьмина.

Основным достоинством проекта СФЕРА–Антарктида является одновременная регистрация флуоресцентного света ШАЛ и интегрального потока черенковского света ШАЛ. Это повышает методическую точность измерений энергии и типа частиц и дает возможность достаточно точно определять направление прихода первичной частицы космического излучения. Высокое угловое разрешение прихода частиц сверхвысоких энергий в проекте СФЕРА–Антарктида позволит зарегистрировать отдельные источники ПКЛ в области энергий свыше  $10^{19}$  эВ.

Методика и размеры площадей регистрации даже таких современных наземных экспериментальных установок, как Оже, ТА и Якутск, оказываются недостаточно эффективными для этих целей. Проектируемая орбитальная установка JEM–EUSO хотя и обладает большой эффективной площадью регистрации, имеет и некоторые недостатки. Сравнение предлагаемой установки с установками, перечисленными выше, приведено в разделе 4.

2. *Аппаратура.* Плоская линза с коррекцией сферической аберрации диаметром  $\sim 0.5$  м и площадью  $S \sim 0.2$  м<sup>2</sup> фокусирует свет ШАЛ на фотодетектор диаметром  $\sim 30$ – $50$  см. В качестве детектора предполагается использовать  $\sim 1000$  плоских полупроводниковых диодов с квантовой эффективностью в максимуме  $\eta_{\max} = 0.4$ . Среднее эффективное значение квантовой эффективности для диапазона длин волн 300–600 нм составляет  $\eta = 0.27$ . Полный угол обзора всей установки равен  $\sim 1$  ср. Полный угол обзора одного пикселя  $Q = 10^{-3}$  ср.

Каждый пиксель детектора осматривает участок трека ШАЛ длиной  $L \approx 1$  км, что соответствует времени регистрации  $t \approx 3$  мкс.

Габариты установки составят  $\sim 0.5 \times 0.5 \times 0.5$  м<sup>3</sup>.

Ориентировочный вес установки 20–50 кг.

3. *Регистрация флуоресцентного и черенковского света ШАЛ. Фон звездного неба.* Среднее число фотоэлектронов от фотонов звездного неба за время  $t = 3 \cdot 10^{-6}$  с составит

$$n_s = I_s \cdot S \cdot Q \cdot t \cdot \eta \cdot C_t,$$

где  $I_s \approx 10^{12}$  квант·м<sup>-2</sup> ср<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup> [8–10],  $C_t \approx 0.7$  – суммарный коэффициент отражения света от снежной поверхности, поверхности защитного стекла и поверхности линзы

$$n_s = 10^{12} \cdot 0.2 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-6} \cdot 0.26 \cdot 0.7 \approx 1.1 \cdot 10^2.$$

Тогда число фотоэлектронов  $n_b$ , соответствующее среднеквадратичному значению флуктуаций звездного фона в одном пикселе, составит

$$N_b = (110)^{0.5} \approx 10.5 \text{ фотоэлектронов.}$$

*Регистрация флуоресцентного света.* Величина полезного сигнала  $n_{\text{fl}}$  от флуоресцентного света ШАЛ длительностью 3.0 мкс в одном из 784 каналов регистрации составит для ШАЛ с энергией  $10^{20}$  эВ

$$n_{\text{fl}} = N_{\text{max}} \cdot 5 \cdot L \cdot S \cdot (4\pi H^2)^{-1} \cdot \eta \cdot C_L,$$

где  $N_{\text{max}} = E/(1.3 \cdot 10^9 \text{ eV}) \approx 8 \cdot 10^{10}$  – число частиц в максимуме ШАЛ, 5 – число фотонов флуоресцентного света на 1 м траектории частицы,  $L \approx 10^3$  м – длина траектории частиц, обзреваемая одним пикселем,  $S \approx 0.2 \text{ м}^2$  – площадь линзы,  $H \approx 25$  км – высота подъема установки,  $\eta = 0.27$  – квантовая эффективность детектора,  $C_L \approx 0.8$  – коэффициент отражения от поверхностей защитного стекла и линзы. Тогда

$$n_{\text{fl}} = 8 \cdot 10^{10} \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 0.2 \cdot (4\pi)^{-1} \cdot (25 \cdot 10^3)^{-2} \cdot 0.27 \cdot 0.8 \approx 2.2 \cdot 10^3 \text{ фотоэлектронов.}$$

Соотношение сигнал/фон для регистрации флуоресцентного света ШАЛ составит  $(n_{\text{fl}}/n_b) = 2.2 \cdot 10^3/10.5 = 2.1 \cdot 10^2$  для ШАЛ с энергией  $10^{20}$  эВ и  $(n_{\text{fl}}/n_b) = 2.1$  для ШАЛ с энергией  $10^{18}$  эВ.

Пороговая энергия регистрации флуоресцентного света ШАЛ составит  $\sim 2 \cdot 10^{18}$  эВ.

Каждый пиксель обзревает часть флуоресцентного трека длиной 1 км, но измерение временной структуры импульса позволит получить внутри этого пикселя дополнительную информацию на флуоресцентном треке для ливней с энергией выше пороговой.

*Регистрация черенковского света.* Величина сигнала от отраженного от снега черенковского света ШАЛ с энергией  $10^{20}$  эВ составит

$$n_{\text{ch}} = (2.5 \cdot 10^7 \cdot E \cdot S \cdot \eta \cdot C)/[2\pi \cdot (2.5 \cdot 10^4)^2],$$

где  $C \approx 0.7$  – суммарный коэффициент отражения от снежной поверхности, поверхности защитного стекла и поверхности линзы,  $E$  дано в ТэВ. Получаем

$$n_{\text{ch}} = (2.5 \cdot 10^7 \cdot 10^8 \cdot 0.2 \cdot 0.27 \cdot 0.7)/[2\pi \cdot (2.5 \cdot 10^4)^2] \approx 2.4 \cdot 10^4 \text{ фотоэлектронов.}$$

Благодаря тому, что отражение от снега происходит диффузно по закону Ламберта вплоть до углов наклона оси ШАЛ  $\sim 80^\circ$ , соотношение сигнал/фон для регистрации

черенковского света ШАЛ составит  $(n_{\text{ch}}/n_b) = 2.4 \cdot 10^4/10.5 \approx 2.3 \cdot 10^3$  для ШАЛ с энергией  $10^{20}$  эВ и  $(n_{\text{ch}}/n_b) \approx 23$  для ШАЛ с энергией  $10^{18}$  эВ.

При угле обзора  $\sim 1$  ср и полете прибора в течение 90 суток полярной ночи на высоте 25 км может быть зарегистрировано  $\sim 10^5$  ШАЛ с энергией больше  $10^{18}$  эВ и несколько сотен событий с энергией больше  $10^{19}$  эВ.

Пороговая энергия регистрации черенковского света ШАЛ составит  $2 \cdot 10^{17}$  эВ. Отраженный от снега черенковский свет дважды проходит приземный слой атмосферы прежде, чем он будет зарегистрирован установкой. Это вызывает дополнительное рассеяние света, учет которого приведет к некоторому повышению пороговой энергии регистрации черенковского света установкой.

4. *Сравнение с другими экспериментами.* При сопоставлении проекта СФЕРА–Антарктида с другими экспериментами следует учитывать, что приведенное в разделе 3 возможное число зарегистрированных событий может быть получено с использованием одного экземпляра установки в период одного длительного двух-трехмесячного полета над Антарктидой. Это обусловлено уникальными ветровыми условиями в Антарктиде в зимний период: циркумполярное круговое движение воздуха в средней части Антарктиды и практическое отсутствие ветра в приполярной области.

В таблице 1 сопоставлены основные параметры установок СФЕРА–Антарктида, Оже [1, 2], ТА [3, 4] и Якутск [5]. В первую очередь, следует провести сопоставление с проработавшей уже 9 лет установкой Оже, эффективная площадь которой существенно больше площади всех остальных установок.

В экспериментах Оже и ТА основным методом определения энергии первичной космической частицы и массового состава ПКЛ служит регистрация формы каскадной кривой развития ШАЛ в атмосфере с помощью четырёх (в случае Оже) или трёх (для ТА) детекторов флуоресцентного света ШАЛ. При этом заметное влияние оказывают рассеянный черенковский свет и поглощение света в достигающем нескольких десятков километров слое плотной приземной атмосферы между детектором и ливнем. Площадь, используемая для этой цели, составляет всего 2% от площади, на которой размещены детекторы заряженных частиц ШАЛ. Для установки Оже эти площади соответственно равны  $60 \text{ км}^2$  и  $3000 \text{ км}^2$  для области энергий больше  $3 \cdot 10^{18}$  эВ и  $120 \text{ км}^2$  и  $3000 \text{ км}^2$  в области энергий больше  $10^{19}$  эВ. Соответствующие кривые зависимости интегральной экспозиции от энергии приведены в работе [1].

Трудности с использованием наземных детекторов черенковского света для определения и энергии, и массового состава ПКЛ в установках Оже и ТА иллюстрирует тот

факт, что массовый состав ПКЛ в области энергий больше ( $10^{18} - 10^{19}$ ) эВ получается сильно отличающимся. Согласно результатам установки ТА состав космических лучей является чисто протонным, а по данным установки Оже он состоит из тяжелых ядер.

Т а б л и ц а 1

Сравнение основных параметров установок  
СФЕРА–Антарктида, Оже [1, 2], ТА [3, 4] и Якутск [5]

Установка	СФЕРА– Антарктида	Оже (Auger)	Telescope ARRAY (ТА)	Якутск
Время работы		9 лет	4 года	40 лет
Площадь регистрации, км <sup>2</sup>	1000	3000 для $D_p$ , 60 для $D_{fl}$	700	10
Количество детекторов $D_p$		1600	507	58
Количество детекторов $D_{fl}$		4 на периферии	3 на периферии	нет
Количество детекторов $D_{ch}$		нет	нет	58
Дискретность размещения $D_p$ и $D_{ch}$		1.5 км	1.2 км	0.5 км
Порог по черенковскому свету ШАЛ	$E_{ch} \sim 2 \cdot 10^{17}$ эВ	$E_{ch} \sim 3 \cdot 10^{18}$ эВ		
Порог по флуоресцентному свету ШАЛ	$E_{fl} \sim 2 \cdot 10^{18}$ эВ	$E_{fl} \sim 5 \cdot 10^{17}$ эВ		
Число событий с $E > 3 \cdot 10^{18}$ эВ	~3000 за 1 год (2–3 месяца полета)	~82300 по $D_p$ , 1470 по $D_{fl}$ (2%) за 9 лет		
Число событий с $E > 10^{19}$ эВ	200–300 за 1 год	~8000 по $D_p$ , ~145 по $D_{fl}$ за 9 лет		

$D_p$  – наземные детекторы заряженных частиц,  $D_{ch}$  – наземные детекторы черенковского света ШАЛ,  $D_{fl}$  – наземные детекторы флуоресцентного света ШАЛ, приведено время работы установок в основном режиме.

События, в которых можно использовать детекторы заряженных частиц, как отмечено в работе [3], не могут быть подвергнуты индивидуальному анализу на предмет сколько-нибудь точного определения положения оси ШАЛ и угла его падения. По углу падения ливни разбиваются на две группы: от  $0^\circ$  до  $60^\circ$  и от  $60^\circ$  до  $90^\circ$ . Создается банк моделированных ШАЛ, данные которого сравниваются с массивом зарегистрированных ШАЛ. На основе сравнения наносятся экспериментальные точки.

Учитывая ширину пространственного распределения частиц ШАЛ вблизи уровня моря, расстояния между детекторами (1.5 км) и то, что число частиц и их пространственное распределение существенно зависят от типа ядра и от модели развития ШАЛ, величина систематических погрешностей точек в энергетическом спектре частиц может быть значительной.

При использовании флуоресцентных детекторов, а без них анализ массового состава был бы просто невозможен, детальность анализа формы энергетического спектра и ядерного состава ПКЛ ограничивается малостью эффективной площади регистрации ( $\sim 60 \text{ км}^2$ ).

За двух-трехмесячный полет установки СФЕРА–Антарктида может быть зарегистрировано в 2 раза большее число событий с энергией более  $3 \cdot 10^{18}$  эВ, чем установкой Оже за 9 лет её работы. Оценка  $\sim 3000$  событий за 1 год получена в предположении, что в области энергий  $> 10^{18}$  эВ интегральный спектр имеет вид  $N(> E) \sim E^{-2}$ . Оценим число событий, которые будут зарегистрированы установкой СФЕРА–Антарктида. Будем исходить из того, что в эксперименте Оже зарегистрировано  $\sim 150$  событий с энергией  $\geq 10^{19}$  эВ за 9 лет. Учитывая разницу в площадях,  $\sim 1000 \text{ км}^2$  и  $\sim 120 \text{ км}^2$  для СФЕРЫ–Антарктида и Оже соответственно, и разницу в доле используемого в течение года времени на измерения  $\sim 20\%$  и  $13\%$  [1], получаем около 220 событий за 1 год.

На Якутской установке энергия ШАЛ определяется по величине потока черенковского света ливня на фиксированном расстоянии от оси ливня (200–300 м). Учитывая большое расстояние между детекторами черенковского света ( $\sim 0.5 \text{ км}$ ), погрешность в определении зенитного угла наклона ШАЛ и зависимость расчётной величины от модели развития ШАЛ, точность определения энергии не может быть высокой. В работе [5] отмечается, что полученные на Якутской установке данные о спектре были перенормированы к данным Оже и ТА, и что планируется усовершенствовать установку с целью повышения точности определения энергии ШАЛ. Площадь этой установки в 100 раз меньше площади установки СФЕРА–Антарктида.

К настоящему времени формы энергетического спектра, полученные в экспериментах Оже, ТА и Якутска в области энергий ( $10^{18} - 10^{19}$ ) эВ, плохо согласуются друг с другом. Противоречивы и данные о массовом составе.

Методика измерения энергетического спектра и массового состава ПКЛ в области энергий ( $10^{18} - 10^{20}$ ) эВ, планируемая в эксперименте СФЕРА–Антарктида путем регистрации формы каскадной кривой ШАЛ при одновременной регистрации энергии калориметрическим методом по полному потоку черенковского света ШАЛ, представляется наиболее адекватной. Полный поток черенковского света очень слабо зависит от типа первичного ядра. Точность определения зенитного угла прихода ШАЛ в эксперименте СФЕРА–Антарктида будет повышена путем регистрации не только амплитуды, но и временной структуры импульсов и временных интервалов между импульсами черенковского и флуоресцентного света ШАЛ.

Установка HiRes состояла из двух наземных оптических детекторов, удаленных друг от друга на расстояние около 12 км, и не содержала в своём составе наземных детекторов заряженных частиц ШАЛ. Оба оптических детектора регистрировали флуоресцентный свет ШАЛ независимо друг от друга, часть событий регистрировались одновременно обоими детекторами. По результатам обработки таких событий был получен спектр ШАЛ до энергий  $\sim 6 \cdot 10^{17}$  эВ. По результатам обработки всех событий, зарегистрированных хотя бы одним из детекторов, построен спектр до энергий  $\sim 3 \cdot 10^{19}$  эВ. Точность определения глубины максимума ШАЛ в атмосфере составила  $\sim 50$  г·см<sup>-2</sup> [13].

В области энергий свыше  $10^{19}$  эВ данные всех четырех установок (Оже, ТА, Якутска и HiRes) плохо согласуются друг с другом.

Преимуществами установки СФЕРА–Антарктида перед установкой HiRes являются:

- 1) Более короткий участок атмосферы от траектории ШАЛ до детектора;
- 2) Более чистая атмосфера от траектории ШАЛ до детектора;
- 3) Одновременная регистрация флуоресценции и интеграла черенковского света ШАЛ, которая повышает точность определения энергии ливня и регистрирует точку пересечения флуоресцентной траектории с поверхностью земли, что улучшает точность определения глубины максимума ШАЛ.

В 2016–17 гг. планируется запуск орбитальной установки JEM–EUSO, предназначенной для измерения энергетического спектра и массового состава ПКЛ в области энергий ( $10^{18} - 10^{20}$ ) эВ. Высота орбиты установки 350–400 км, диаметр оптической системы 2.1 м, угол обзора  $\pm 30^\circ$ , число пикселей на фокальной поверхности равно  $3.2 \cdot 10^5$ , длина осматриваемого одним пикселем участка флуоресцентного света ШАЛ вблизи уровня

моря составит  $\sim 550$  м. Угловое разрешение каждого пикселя составляет  $0.07^\circ$ .

Приведенные в [11] расчеты и результаты измерений спутника Татьяна показали, что доля полезного для измерений времени, обусловленная сменой дня и ночи, светом Луны и наличием облаков, составит 0.12 суток. При этом считалось, что наличие облаков в слое ниже 3 км не будет влиять на возможность измерения глубины максимума развития ШАЛ. Считалось, что во всей области энергий глубина максимума расположена выше 3 км. Согласно расчетам авторов [11] точность определения энергии ШАЛ составит 30%, а точность измерения глубины максимума развития ШАЛ –  $120$  г/см<sup>2</sup>. Область чувствительности светоприемников (330–400) нм. Принималось, что можно проводить измерения, если яркость света Луны не превышает  $500$  квант·м<sup>-2</sup>·нс<sup>-1</sup>.

Сопоставим характеристики установок СФЕРА–Антарктида и JEM-EUSO. Пороговая область определения энергии по измерению флуоресцентного света ШАЛ для установки JEM-EUSO составляет  $(1–3) \cdot 10^{19}$  эВ, что в несколько раз выше, чем порог нашей установки по измерению флуоресцентного света ШАЛ и в несколько десятков раз выше, чем порог нашей установки по измерению черенковского света ШАЛ. Установка JEM-EUSO не может регистрировать черенковский свет сколько-нибудь точно.

Возможность изучения массового состава ПКЛ с помощью установки JEM-EUSO находится под вопросом в связи с невысокой точностью определения глубины максимума ШАЛ ( $\sim 120$  г/см<sup>2</sup>). Установка СФЕРА–Антарктида будет определять глубину максимума с гораздо лучшей точностью, благодаря тому, что в каждом ливне одновременно с флуоресцентным светом регистрируется и черенковский свет. Одновременная регистрация флуоресцентного трека и отраженного от поверхности черенковского света ШАЛ дает возможность изучения анизотропии потока ПКЛ в области энергий ( $10^{18} – 10^{20}$ ) эВ.

Преимуществом установки JEM-EUSO является то, что эффективная площадь регистрации ШАЛ для этой установки на 2 порядка выше, чем для установки СФЕРА–Антарктида. При запуске двух-трёх установок в год эту разницу можно уменьшить до полутора порядков. Не исключено, что окажется возможным получение данных и в области энергий ( $10^{18} – 10^{21}$ ) эВ.

В любом случае, реализация проекта СФЕРА–Антарктида окажется хорошим связующим звеном между установками Оже, ТА, Якутской и установкой JEM-EUSO.

5. *Поглощение света в атмосфере.* Доля света, доходящего до поверхности Земли после прохождения всего слоя атмосферы по вертикали, составляет величину  $e^{-K}$ , где  $K$  – коэффициент экстинкции, включающий поглощение и рассеяние света. Величина

$K$  зависит от длины волны света  $\lambda$  (см. табл. 2 [14]).

Спектр флуоресцентного света состоит из нескольких линий в диапазоне от 300 до 450 мкм. Среднее эффективное значение потерь на поглощение и рассеяние флуоресцентного света в атмосфере составляет  $\sim 0.3$ .

Т а б л и ц а 2

*Зависимость параметров поглощения света от длины волны [14]*

$\lambda$ , нм	$K$	$e^{-K}$	$1 - e^{-K}$
300	0.058	0.95	0.05
360	0.57	0.57	0.43
400	0.36	0.70	0.30
500	0.15	0.86	0.14
550	0.098	0.91	0.09

Спектр черенковского света продолжается до глубокого инфракрасного по спектру  $\sim E^{-3}$ . Среднее эффективное значение потерь при отражении черенковского света от снежной поверхности составляет  $\sim 0.14$ . С учётом того, что черенковский свет проходит через атмосферу, значение потерь составит также  $\sim 0.30$ . В результате, поправка в величину расчётных порогов регистрации и черенковского, и флуоресцентного света составит  $\sim 30\%$ . Эта поправка незначительна, так как основной целью эксперимента является изучение энергетического спектра и массового состава ПКЛ в области энергий  $\geq 10^{18}$  эВ.

*Заключение.* Предлагаемая миниатюрная аэростатная установка позволит получить более точные данные об энергетическом спектре в области энергий ( $10^{18} - 10^{20}$ ) эВ и массовом составе ПКЛ в этой области энергий. Подобный эксперимент со значительно более громоздкой и тяжелой аппаратурой планировался ранее [12], но не был осуществлён по объективным обстоятельствам. При наличии достаточного финансирования могут быть изготовлены и одновременно запущены два или три экземпляра установки СФЕРА–Антарктида.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] M. Unger, E.J. Ahn, Inferences about the Mass Composition of Cosmic Rays from Data on the Depth of Maximum at the Auger Observatory, in: Proc. of 33th ICRC (Rio de Janeiro, 2013); <http://www.cbpf.br/icrc2013/papers/icrc2013-0690.pdf>.

- [2] Alexander Schulz, The measurement of the energy spectrum of cosmic rays above  $3 \cdot 10^{17}$  eV with the Pierre Auger Observatory, in: Proc. of 33th ICRC (Rio de Janeiro, 2013); <http://www.cbpf.br/icrc2013/papers/icrc2013-0769.pdf>.
- [3] Tsunesada Yoshiki, Collaboration for The Telescope Array. Telescope Array Composition Measurements, in: Proc. of 33th ICRC (Rio de Janeiro, 2013); <http://www.cbpf.br/icrc2013/papers/icrc2013-0132.pdf>.
- [4] Bergman Douglas, Collaboration for The TA/TALE. Telescope Array Measurements of the UHECR Energy Spectrum, in: Proc. of 33th ICRC (Rio de Janeiro, 2013); <http://www.cbpf.br/icrc2013/papers/icrc2013-0221.pdf>.
- [5] Anatoly Ivanov, The Yakutsk array experiment: Main results and future directions, EPJ Web of Conferences. Vol. 53, 04003 (2013). URL: <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20135304003>.
- [6] A. E. Chudakov, in Proceedings of the 5th Interamerican Symposium on Cosmic Rays, Vol. 2 (Laboratorio de Fizica Cosmica de la Univ. Mayor de San Andres; La Paz, Bolivia; 1962), p. 44.
- [7] А. Е. Чудаков, Возможный метод регистрации ШАЛ по черенковскому излучению, отраженному от заснеженной поверхности земли. Экспериментальные методы исследования космических лучей сверхвысоких энергий. Материалы Всесоюзной симпозиума 19–23 июня 1972 г., г. Якутск (Якутский филиал Сибирского отделения Академии Наук СССР, 1974), с. 69.
- [8] К. К. Чуваев, Доклады Академии Наук СССР **87**(4), 551 (1952).
- [9] Ф. Роч, Дж. Гордон, *Свечение ночного неба* (М., Мир, 1977), с. 135.
- [10] M. Bott–Bodenhausen, I. Holl, A. Kabelchaht, et al., Nuclear instruments and methods in Physics Research **A315**, 247 (1992). in: Proc. of 31th ICRC (Beijing, 2011). URL: <http://arxiv.org/abs/1204.5065>.
- [11] The JEM-EUSO Mission: Status and Prospects in 2011, Proc. of 31th ICRC (Beijing, 2011). URL: <http://arxiv.org/abs/1204.5065>.
- [12] R. A. Antonov, D. V. Chernov, L. A. Kuzmichev, et al., Antarctic Balloon–Borne Measurements of the CR spectrum above eV (project). Proc. of 27th ICRC (Hamburg, Copernicus Gesellschaft, 2001). Vol. 2, p. 828.
- [13] R. U. Abbasi, T. Abu–Zayyad, G. Archbold, et al., The Astrophysical Journal **622**, 910 (2005).
- [14] Ю. М. Тимофеев, А. В. Васильев, *Основы теоретической атмосферной оптики* (Санкт-Петербург, Физический факультет СПбГУ, 2007).

Поступила в редакцию 25 ноября 2014 г.