

# Космические лучи предельно высоких энергий: перспективы исследования с помощью детекторов космического базирования

М. И. Панасюк, Б. А. Хренов<sup>a</sup>

*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скobelцины, Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*  
*E-mail: <sup>a</sup>bkhrenov@yandex.ru*

Статья поступила 02.12.2009, подписана в печать 12.01.2010

Экспериментальное изучение космических лучей высоких энергий в Научно-исследовательском институте ядерной физики МГУ базируется на наследии, оставленном Сергеем Николаевичем Верновым. В работах Грейзена–Зацепина–Кузьмина (ГЗК) в области ультравысоких энергий  $\sim 5 \cdot 10^{19}$  эВ предсказано резкое изменение энергетического спектра космических лучей. В этих работах и работах последних лет высказаны гипотезы о связи вида спектра за пределом ГЗК с эволюцией Вселенной на самой ранней стадии ее развития, что вызывает особый интерес к изучению таких «предельно высоких» энергий. Вместе с тем экспериментальное изучение частиц столь высоких энергий встречает трудности в связи с их исключительно низкой интенсивностью. Для развития метода регистрации частиц на максимальной площади порядка площади диска Земли в последние годы предложен переход от наземных детекторов к детекторам космического базирования. Обсуждается программа космических экспериментов для изучения частиц космических лучей предельно высоких энергий.

**Ключевые слова:** космические лучи, высокие энергии, детектор, флуоресценция атмосферы.

УДК: 240.1. PACS: 95.55.–n.

## Введение

Решение одной из самых интересных проблем физики космических лучей — происхождение космических лучей самых высоких энергий, в области энергетического предела Грейзена–Зацепина–Кузьмина (ГЗК,  $5 \cdot 10^{19}$  эВ), прямо связано с наследием, которое оставил нам С. Н. Вернов. С. Н. Вернов первым обратил внимание на решающую роль электромагнитных ливней в каскадном процессе взаимодействий, вызванных первичным протоном космических лучей. По данным детекторов, расположенных на высотных баллонах, он показал существование эффективного механизма передачи энергии от первичного протона в электронно-фотонный каскад [1]. Этот вывод был сделан накануне открытия нейтрального пиона, рождение которого при взаимодействии протона с ядрами атомов атмосферы и дает конкретный механизм передачи энергии в электромагнитный каскад. В результате этого открытия стало ясно, что энергия первичного протона (или первичного ядра) в каскадном процессе взаимодействия вторичных частиц в основном переходит в энергию электронов и фотонов каскада и в конечном счете тратится на ионизацию атомов и молекул атмосферы. Таким образом, измерение полного числа частиц электронно-фотонного каскада в атмосфере — основной компоненты так называемых широких атмосферных ливней (ШАЛ) — стало методом измерения энергии первичных частиц космических лучей самых высоких энергий. С. Н. Вернов постоянно уделял внимание совершенствованию метода измерения ШАЛ для изучения энергетического спектра космических лучей. При его поддержке и под руководством Г. Б. Христиансена в МГУ была создана одна из самых масштабных мировых установок для изучения ШАЛ. На этой установке

было окончательно установлено изменение энергетического спектра первичных космических лучей при энергии  $3 \cdot 10^{15}$  эВ. Излом показателя интегрального спектра от значения 1.7 для энергий  $E < 3 \cdot 10^{15}$  эВ к значению 2.1 для энергий выше  $3 \cdot 10^{15}$  эВ был зарегистрирован как открытие [2] с приоритетом в работе Христиансена и Куликова 1958 г. [3]. Изучение первичного энергетического спектра космических лучей при энергиях  $10^{15}–10^{17}$  эВ продолжается и в настоящее время (см., напр., [4]). Наиболее правдоподобное объяснение излома спектра, наблюдаемого при энергии  $3 \cdot 10^{15}$  эВ, состоит в том, что здесь сказывается влияние двух факторов: 1) максимальные энергии частиц, ускоряемых в галактических источниках (оболочках Сверхновых), соответствуют примерно этим энергиям и 2) при этих энергиях значение диффузионного пробега частиц в Галактике увеличивается до ее размеров и частицы быстрее покидают Галактику. Не подвергается сомнению, что именно взрывы Сверхновых в «нашей» Галактике являются источником частиц космических лучей с энергией в области излома ( $10^{15}–10^{17}$  эВ).

С. Н. Вернов поддерживал всестороннее исследование ШАЛ при энергиях порядка  $10^{15}$  эВ, при которых, по представлениям теоретиков 1960-х гг., первичные частицы космических лучей преодолевали «унитарный» предел. При энергиях взаимодействия выше этого предела предполагалось, что разница в «сильных» и «слабых» взаимодействиях стирается и открывается возможность прямой генерации лептонов (в частности, мюонов). В таком «сценарии» значительная часть энергии первичной частицы могла быть не измерена по данным об электронно-фотонном ливне в атмосфере. При планировании установки МГУ для изучения ШАЛ большое внимание было уделено исследованию потоков мюонов. Для изучения «мюонной» компоненты ШАЛ

было создано подземное помещение на глубине 33 м (энергетический порог для проникновения мюонов на эту глубину — 10 ГэВ), где был построен магнитный спектрометр мюонов с предельно измеримой энергией 500 ГэВ [5] и измерен энергетический спектр мюонов на разных расстояниях от оси ШАЛ [6]. Оказалось, что мюоны вблизи оси ШАЛ обладают энергией в сотни ГэВ, как ожидается по теории «стандартного» развития ШАЛ, но не энергией порядка  $10^{14}$  эВ, как предсказывала гипотеза о «прямом» рождении мюонов. Важным результатом измерения энергии мюонов в подземном помещении стало установление верхнего предела (12%) для энергии, уносимой мюонной компонентой ШАЛ из атмосферы [7]. Этот результат еще раз подтвердил, что энергия электронно-фотонного атмосферного ливня является точной мерой энергии первичных частиц космических лучей.

### **1. Ионизационное свечение (флуоресценция) атмосферы и его использование для дистанционного наблюдения развития электронно-фотонного ливня в атмосфере**

В поисках наиболее адекватного метода измерения энергии первичной частицы по данным об электронно-фотонной компоненте ШАЛ А. Е. Чудаковым были проанализированы и испытаны возможности измерения числа электронов по вторичному излучению, которое характерно для прохождения электронов через атмосферу. Это, во-первых, черенковское излучение [8] и, во-вторых, флуоресценция атмосферы (высвечивание возбужденных молекул и атомов атмосферы при их ионизации) [9]. Оба эти излучения оказались в области высокой прозрачности атмосферы, что дает возможность разработать наземные детекторы черенковского излучения и флуоресценции атмосферы, позволяющие наблюдать электронно-фотонный ливень высоко в атмосфере. Такое наблюдение имеет важное преимущество перед прямым измерением потока электронов: оказывается возможным измерять число электронов в максимуме развития ливня, которое прямо пропорционально первичной энергии. Кроме того, измерение глубины атмосферы, где ливень достигает максимума, позволяет оценить массу первичной частицы. Измеряя распределение ШАЛ по глубинам максимума, можно определить ядерный состав первичного излучения при высоких энергиях.

Как известно, черенковские детекторы ШАЛ нашли широкое применение как при изучении энергетического спектра и массового состава космических лучей сверхвысокой энергии ( $E > 10^{15}$  эВ) [4], так и в работах по поиску точечных источников со сравнительно низкой энергией ( $10^{10} - 10^{12}$  эВ).

Детекторы флуоресценции играют особую роль при изучении ШАЛ самых высоких энергий. Выход флуоресценции на один электрон весьма мал, и этим методом можно воспользоваться лишь при огромных потоках электронов в ливнях с энергией более  $10^{18}$  эВ. Благодаря изотропии излучения флуоресценции этот метод позволяет осуществить поиск и измерение ливней на большой площади в атмосфере (сотни  $\text{км}^2$ ) с помощью малого числа детекторных пунктов. Это выгодно отличает метод наблюдения флуоресценции от метода

наблюдения черенковского излучения, сконцентрированного в узком ( $\sim 5^\circ$ ) конусе углов в направлении движения первичной частицы. В работе первого детектора флуоресценции, так называемого «Глаза муши» (Fly's Eye) [10], были продемонстрированы преимущества нового метода в точности измерения первичной энергии и возможности измерения ШАЛ на расстояниях до 20 км. Флуоресцентный метод измерения первичной энергии и каскадной кривой ШАЛ стал надежным методом изучения ШАЛ самых высоких энергий после создания детектора высокого разрешения HiRes [11] и создания системы флуоресцентных детекторов в «Обсерватории Пьер Оже», работающей в сочетании с сетью наземных детекторов потока заряженных частиц ШАЛ [12].

### **2. Эффект Грейзена–Зацепина–Кузьмина**

В 1966 г. сразу после открытия «фонового космического радиоизлучения» с температурой около 2.7 К, оставшегося после Большого взрыва, в работах Грейзена, Зацепина и Кузьмина [13, 14] было показано, что в области энергии  $5 \cdot 10^{19}$  эВ может существовать обрыв энергетического спектра космических лучей за счет взаимодействия протонов и ядер космических лучей с фотонами этого «реликтового» излучения. Обнаружение такого «обрыва» спектра указывало бы на то, что источники космических лучей столь высоких энергий находятся на космологических расстояниях  $\gg 100$  Мпк. Такое предсказание вызвало огромный интерес к изучению космических лучей самых высоких (предельных) энергий. По инициативе С. Н. Вернова была создана кооперация двух ведущих институтов в области изучения ШАЛ (НИИЯФ МГУ и ФИАН) и на базе Якутского филиала СО АН СССР в конце 1960-х гг. началось строительство огромной по тем временам Якутской установки с площадью измерения осей ШАЛ до  $20 \text{ км}^2$ . Якутская установка была введена в строй коллективом вновь созданного ИКФИА СО АН СССР в 1975 г. Примерно в это же время были созданы установки Волкано-Ренч (США), Хавера Парк (Великобритания) и Нарабрай (Австралия). На этих установках были проведены измерения в области энергий далеко за первым изломом спектра (энергии выше  $10^{17}$  эВ). Измерения на этих установках с экспозицией  $\sim 1000 \text{ км}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{год}$  и позже на установках с еще большей рабочей площадью (установка AGASA в Японии с экспозицией  $\sim 1700 \text{ км}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{год}$ , установка HiRes в США с экспозицией для частиц с энергией менее  $10^{19}$  эВ  $\sim 2000 \text{ км}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{год}$ ) показали, что при энергиях  $\sim 3 \cdot 10^{18}$  эВ (еще далеко до предела ГЗК) спектр космических лучей возвращается к виду, наблюдаемому до излома. На рис. 1 представлены современные данные об энергетическом спектре космических лучей с энергией в широком диапазоне энергий от  $10^{12}$  эВ до энергий  $\sim 10^{20}$  эВ.

Здесь в области «малых» энергий представлены данные уникального калориметра НИИЯФ МГУ, работавшего на спутнике «Протон» [15]; в области излома спектра — данные [16] установки ШАЛ МГУ, данные [17] установки «Тунка» и данные [18] установки Kascade-Grande. В области самых высоких энергий приведены данные Якутской установки [19] и установок

ШАЛ последнего поколения: HiRes [20] и Обсерватории Пьер Оже [21]. Как видно из рисунка, при энергиях выше первого излома данные несколько расходятся по абсолютной интенсивности. Это следствие трудности определения абсолютной меры энергии для каждой из экспериментальных установок. Если отдать предпочтение данным, полученным «калориметрическим» методом, по интегральному числу частиц в каскаде [15, 17, 20, 21], то ярко выделяются три области изменения вида спектра: 1) первый излом спектра в сторону его смягчения при энергии  $E \sim 3 \cdot 10^{15}$  эВ, 2) возвращение к «жесткому» спектру при энергиях  $E \sim 3 \cdot 10^{18} - 10^{19}$  эВ и 3) новый излом спектра в сторону смягчения при пределе ГЗК  $\sim 5 \cdot 10^{19}$  эВ. Выше обсуждалась природа первого излома. Возвращение к жесткому спектру при энергиях  $E \sim 3 \cdot 10^{18}$  эВ указывает на то, что при таких ультравысоких энергиях основной поток частиц создают ускорители внегалактического происхождения с максимальной энергией значительно больше галактической. Отметим, что вклад внегалактических космических лучей при энергиях  $E \sim 10^{15} - 10^{16}$  эВ (обозначенный пунктиром на рисунке) на порядок меньше вклада галактических космических лучей. Излом в области энергии  $5 \cdot 10^{19}$  эВ предсказан в работах Грейзена–Зацепина–Кузьмина.

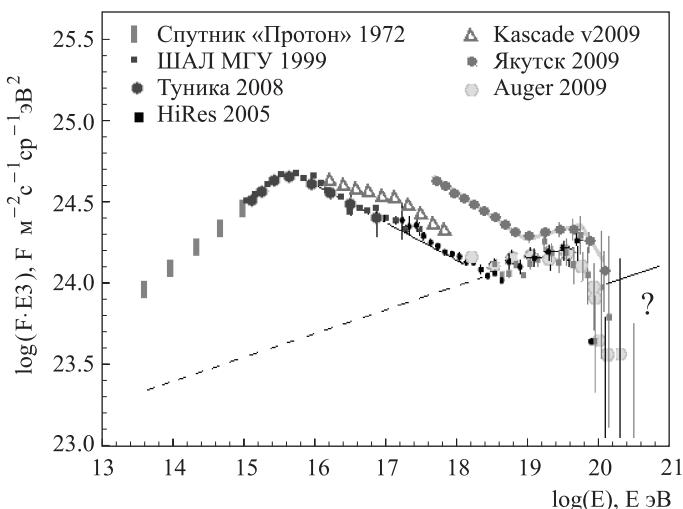


Рис. 1. Энергетический спектр космических лучей в широком диапазоне энергий

Измерения энергетического спектра в области «пределенно высокой» энергии ( $E > 5 \cdot 10^{19}$  эВ) очень трудны из-за малого количества таких частиц. Для наблюдения этих редких событий необходимо создавать сеть детекторов частиц ШАЛ на площади в тысячи квадратных километров. На ней располагают как детекторы потока частиц, так и флуоресцентные детекторы излучения, создаваемого частицами ШАЛ в атмосфере. Две такие установки уже построены: с площадью  $\sim 3000$  км<sup>2</sup> (обсерватория Пьер Оже в Аргентине) и  $\sim 700$  км<sup>2</sup> (Телескопическая установка в штате Юта, США). Пока экспозиция этих установок недостаточна для окончательных выводов об энергетическом спектре в области  $E > 10^{20}$  эВ, но экспериментальные данные обсерватории Пьер Оже подтверждают данные установки HiRes о существовании изменения энергетического спектра

в области предела ГЗК. Вместе с тем видно, что современная статистика событий не дает убедительных данных об обрыве спектра при энергиях  $E \gg 10^{20}$  эВ. Пока возможны поиски частиц и их источников с энергией  $E > 2 \cdot 10^{20}$  эВ.

В последние десятилетия накоплены многочисленные астрономические данные о внегалактических объектах, способных ускорять заряженные частицы до энергий гораздо больше  $10^{19}$  эВ. Очевидным признаком того, что объект размером  $D$  может ускорять частицы до энергии  $E$  (эВ), служит наличие на всем протяжении этого объекта магнитного поля  $B$  (Гс) такого, что гиро-радиус частицы  $R = E/(3 \cdot 10^4 B)$  см меньше  $D$ . К таким источникам-кандидатам относятся:

- «радио»-галактики (галактики, испускающие мощное радиоизлучение);
- ядра активных галактик, содержащие «черные дыры»;
- сталкивающиеся галактики.

Все эти источники содержат струи газа (плазмы), движущиеся с огромными скоростями, приближающиеся к скорости света. Такие струи играют роль «ударных волн», необходимых для работы ускорителя. Чтобы оценить их вклад в наблюдаемую интенсивность космических лучей, нужно учесть распределение источников по расстояниям от Земли и потери энергии частиц в межгалактическом пространстве. До открытия фонового космического радиоизлучения межгалактическое пространство казалось «пустым» и прозрачным не только для электромагнитного излучения, но для частиц ультравысокой энергии. Плотность газа в межгалактическом пространстве по астрономическим данным настолько мала ( $10^{-29}$  г/см<sup>3</sup>), что даже на огромных расстояниях в сотни миллиардов световых лет ( $10^{26}$  см) частицы не испытывают взаимодействия с ядрами атомов газа. Однако когда было показано, что Вселенная наполнена фотонами с плотностью примерно 500 фотонов/см<sup>3</sup> и энергией  $E_\phi \sim 10^{-3}$  эВ, оставшимися после Большого Взрыва, стало ясно, что протоны и ядра с энергией больше предела ГЗК должны взаимодействовать с фотонами и терять большую часть своей энергии на пути более 100 млн световых лет. Таким образом, подавляющая часть Вселенной, находящаяся на расстояниях более  $10^8$  световых лет от нас, недоступна для наблюдения космических лучей с энергией более  $5 \cdot 10^{19}$  эВ.

Среди астрофизических объектов — кандидатов на роль источников космических лучей предельно высоких энергий — самыми перспективными оказались ядра активных галактик (AGN) со струями газа. Один из наиболее хорошо изученных объектов — галактика M-87 в созвездии Дева на расстоянии  $\sim 50$  млн световых лет от нашей Галактики. В ее центре находится «черная дыра», которая обеспечивает энергией процессы вблизи нее и в частности гигантскую струю плазмы, принадлежащей этой галактике.

Как показывают оценки [22] светимости галактики M-87 в космических лучах с энергией выше предела ГЗК, поток частиц только из этой галактики может объяснить наблюдаемую интенсивность космических лучей в предположении, что в межгалактическом пространстве между M-87 и Галактикой Млечный путь

находится облако магнитного поля, отклоняющее и рассеивающее заряженные частицы космических лучей. Гипотетическое присутствие магнитного облака объясняет, почему  $M\text{-}87$  не наблюдается как источник космических лучей предельно высоких энергий при доступной в настоящее время статистике событий. Новые детекторы с экспозицией на 1–2 порядка большей, чем существующие, позволят изучать анизотропию в направлении источников, подобных  $M\text{-}87$ .

При ограниченных экспозициях существующих детекторов поиск источников космических лучей предельно высокой энергии проводится путем анализа корреляции экспериментально измеренного направления прихода частиц с координатами какого-либо специально выделенного класса астрофизических объектов. Последние данные установки «Обсерватория Пьер Оже» [23], в которых выявлена корреляция направления прихода частиц с энергией выше  $6 \cdot 10^{19}$  эВ с источниками AGN, можно рассматривать как надежду на получение в ближайшие годы данных об источниках частиц с энергией порядка предела ГЗК.

### 3. Подготовка детекторов космического базирования для изучения космических лучей за пределом ГЗК

Как видно из предыдущего раздела, данные существующих наземных детекторов космических лучей предельно высокой энергии пока не дали окончательного ответа на поставленный вопрос о существовании и физической природе частиц вблизи предела ГЗК и больше него. Для решения этой задачи необходимо найти способ наблюдения частиц предельно высокой энергии с экспозицией на два порядка большей, чем имеют (или накаплят в течение 10 ближайших лет) существующие детекторы. Таким способом может стать метод наблюдения флуоресценции ШАЛ с борта ИСЗ, предложенный в 1980 г. Линсли [24]. НИИЯФ МГУ благодаря большому опыту работ как с наземными установками ШАЛ, так и с разнообразными орбитальными детекторами оказался готов к созданию детектора ШАЛ космического базирования. В кооперации с несколькими странами в России подготавливается первый космический эксперимент по изучению частиц предельно высоких энергий ТУС (Трековая установка) [25, 26]. Этот детектор состоит из двух основных частей: 1) зеркала-концентратора площадью  $2 \text{ м}^2$  и 2) расположенного в фокусе зеркала фотоприемника, состоящего из 256 ячеек, равномерно заполняющих поле зрения детектора. Детектор ТУС является основной частью научной аппаратуры спутника МГУ «Михаило Ломоносов», подготавливаемого к запуску в ноябре 2011 г. в честь 300-летия М. В. Ломоносова.

На рис. 2 показан принцип работы орбитального детектора. На рис. 3 показан момент сборки составного зеркала-концентратора площадью  $2 \text{ м}^2$  и на рис. 4 — фотоприемник детектора.

Детектор космического базирования обладает следующими преимуществами.

1. Возможность наблюдения ШАЛ на огромной площади атмосферы благодаря большому расстоянию от детектора до атмосферы. При высоте спутника

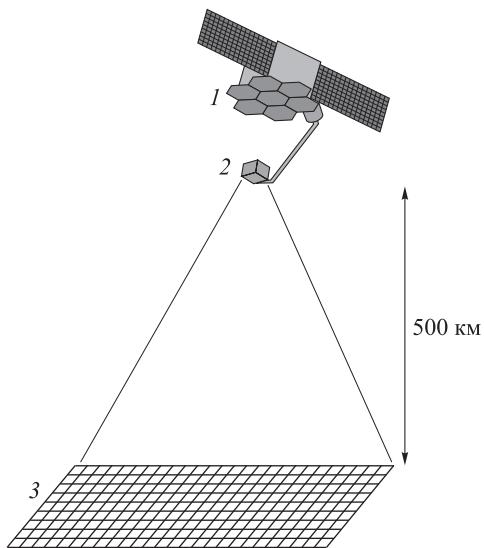


Рис. 2. Схема наблюдения ШАЛ предельно высоких энергий с помощью космического детектора ТУС: 1 — зеркало-концентратор, 2 — фотоприемник, 3 — атмосфера в поле зрения сети ячеек фотоприемника

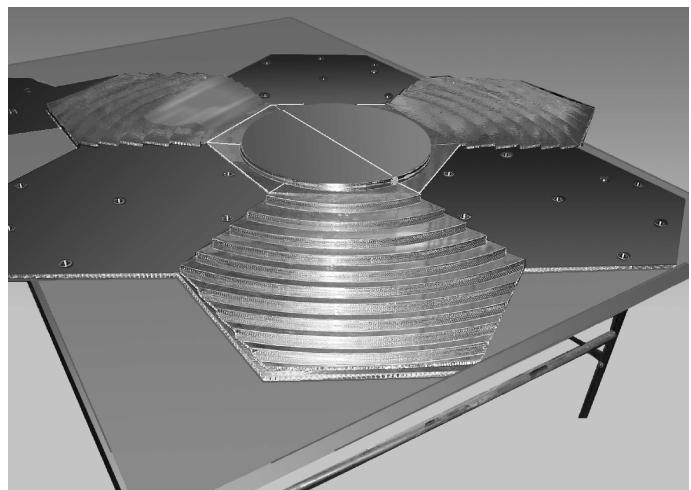


Рис. 3. Зеркало-концентратор в процессе сборки

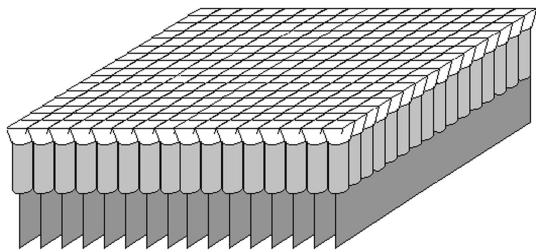


Рис. 4. Фотоприемник из 256 ФЭУ с платами электроники

«Михаило Ломоносов» 500 км детектор ТУС обзревает площадь атмосферы  $6400 \text{ км}^2$ .

2. За год работы на орбите один и тот же детектор наблюдает всю небесную сферу, что позволит изучить распределение источников космических лучей предельно высоких энергий, несмотря на возможную неточность определения энергии первичной частицы. При

изучении распределения направлений прихода частиц с помощью нескольких наземных установок возникает неизбежная разница в интенсивности, наблюдалась в разных областях неба разными установками, из-за разницы в абсолютном значении энергии для каждой из них.

Вместе с тем перенос флуоресцентного детектора на орбиту ИСЗ встречает ряд трудностей:

а) наблюдение ШАЛ с расстояния примерно в 10 раз большего, чем в наземных условиях, повышает требования к чувствительности и разрешающей способности оптической системы и фотоприемника. Желательное разрешение одной ячейки приемника должно быть равным диаметру пространственного распределения электронов в ливне. Для высоты орбиты спутника порядка 500 км угловое разрешение орбитального детектора должно быть порядка 0.4–2 мрад — на порядок выше, чем у существующих наземных детекторов, угловое разрешение которых составляет 20 мрад;

б) уровень светового шума ночной атмосферы при наблюдении с орбиты ИСЗ изменяется на пути полета. Данные спутника «Университетский-Татьяна» [27] дают оценки интенсивности фонового излучения УФ в пределах от  $5 \cdot 10^7$  до  $2 \cdot 10^9$  фот  $\cdot$  см $^{-2}$   $\cdot$  ср $^{-1}$   $\cdot$  с $^{-1}$  (максимальные значения интенсивности наблюдаются при полнолунии, а также при пролете над областями полярных сияний). В специально выбранных местах расположения наземных установок этот шум не превышает  $5 \cdot 10^7$  фот  $\cdot$  см $^{-2}$   $\cdot$  ср $^{-1}$   $\cdot$  с $^{-1}$ ;

в) при пролете над экваториальными районами Земли, где высока электрическая активность атмосферы, к среднему уровню шума добавляются импульсные помехи от молний и сопровождающих их высотных разрядов;

г) техника орбитального флуоресцентного детектора должна удовлетворять сложным условиям, в которых работает любая «космическая» техника.

Ввиду этих трудностей была подготовлена программа [25] постепенного перевода техники флуоресцентных детекторов от наземного варианта к «космическому». Детектор ТУС является первым достаточно простым прибором, который позволит оценить точность, надежность и стабильность работы разработанных для «космических» условий элементов как оптической системы, так и фотоприемника. Согласно программе [26] следующим детектором должен быть детектор КЛПВЭ на российском сегменте МКС. У этого детектора площадь зеркала-концентратора увеличена до  $10 \text{ м}^2$ , а число ячеек фотоприемника до 2500. В качестве самого масштабного варианта детектора программы [26], который смог бы обозревать атмосферу на всем диске Земли, предлагается детектор на геостационарной орбите с площадью зеркала порядка тысячи  $\text{м}^2$  и числом ячеек до миллиона. Для выполнения подобной программы потребуются большие усилия, эта программа в настоящее время прорабатывается совместно с ЦНИИМАШ. Проект ТУС первого космического детектора для изучения космических лучей в области предела ГЗК вошел в Федеральную программу исследований на ИСЗ, прошел стадию НИР и подготавливается к работе в составе аппаратуры спутника «Михаило Ломоносов». В этом проекте принимают участие Объединенный институт

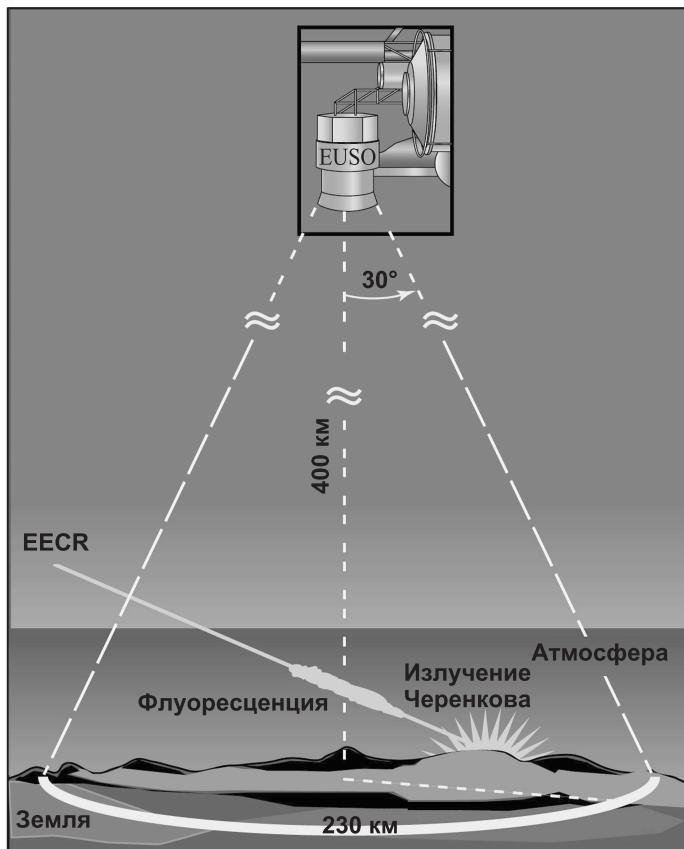
ядерных исследований (Дубна) и Университеты Кореи и Мексики.

Элементы фотоприемника детектора ТУС (фотоэлектронный умножитель, блок его питания, электроника отбора и регистрации полезных событий) были проверены в работе на микроспутнике МГУ «Университетский-Татьяна» [27]. С помощью детектора УФ излучения, построенного на основе конструкции одной ячейки детектора ТУС, было проведено измерение фона излучения ночной атмосферы на трассе будущего полета детектора ТУС. В районе экватора были обнаружены и исследованы вспышки ультрафиолетового излучения. На основе этих данных проведены оценки рабочего цикла детектора ТУС и оценки экспозиции детектора ТУС для различных пороговых энергий частиц космических лучей. Показано, что за три года работы при регистрации частиц с энергией более  $3 \cdot 10^{20}$  эВ детектор ТУС наберет экспозицию  $12\,000 \text{ км}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{год}$  — примерно равную экспозиции, ожидаемой в ближайшие годы на ныне действующей самой большой наземной установке «Обсерватория Пьер Оже».

Экспозиция следующих орбитальных детекторов перекроет во много раз экспозицию детектора ТУС. Помимо упомянутых выше детекторов, разрабатываемых в России, международная коллaborация университетов и институтов (с участием российских ученых) подготавливает космический детектор на базе широкоугольной оптики линз Френеля с использованием большого числа ячеек фотоприемника (до 100 тыс.): детектор JEM-EUSO [28]. На рис. 5 представлена общая схема работы этого детектора. Ожидаемая экспозиция для частиц с энергией выше  $10^{20}$  эВ за три года работы  $10^6 \text{ км}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{год}$ .

Следует подчеркнуть, что оба типа детекторов — космического базирования и наземные — не исключают, а дополняют друг друга [29]. С помощью детекторов космического базирования будет просматриваться вся небесная сфера, однако наблюдение одного специального источника с помощью орбитального детектора оказывается менее эффективно по сравнению с наземным детектором, расположенным в оптимальном для наблюдения этого источника месте на Земле. Поэтому после обнаружения космическим детектором преимущественного направления прихода частиц предельно высоких энергий возможно создание нового наземного детектора для изучения этих частиц.

Интересной особенностью работы орбитального детектора будет его работа над океаном. В этом случае появляется возможность наблюдения сигнала из океана, созданного частицами высокой энергии, еще не успевшими передать свою энергию электронно-фотонному ливню в атмосфере. При энергиях  $E > 10^{20}$  эВ максимум вертикально направленного ШАЛ находится вблизи уровня океана, и примерно половина первичной энергии ШАЛ сохраняется в частицах высоких энергий. Эти частицы создают продолжение ливня в плотной среде океана. Ливень в океане сконцентрирован в пространстве: его длина до полного поглощения составляет десятки метров, а поперечник менее метра. По своим наблюдаемым свойствам (малая длительность сигнала, малый размер) такой ливень заметно отличается от атмосферного ливня и в принципе может



*Ruc. 5. Наблюдение атмосферы Земли с помощью детектора JEM-EUSO*

быть выделен на фоне сигнала атмосферного ливня. Одновременное измерение ливня в атмосфере и в океане позволит проверить, насколько верны наши представления о развитии ядерного каскада при энергиях взаимодействия, недоступных для ускорителей.

### Заключение

Дальнейшие успехи в изучении космических лучей предельно высокой энергии связаны с созданием детекторов космического базирования. Наследие Сергея Николаевича Вернова позволяет успешно проводить работу НИИЯФ МГУ в этом направлении исследований. Наступает время новых интересных результатов в области физики космических лучей предельно высокой энергии.

### Список литературы

1. Вернов С.Н., Чарахчян А.Н. // Докл. АН СССР. 1948. **62**. С. 319; Барадзей Л.Т., Вернов С.Н., Смородин Ю.А. // Докл. АН СССР. 1948. **63**. С. 233.
2. Вернов С.Н., Христиансен Г.Б., Абросимов А.Т. и др. // Сб. кратких описаний открытий. М., 1971. Диплом № 84. С. 3.
3. Kristiansen G.B., Kulikov G.V. // Nuov. Cim. Suppl. 1958. **8**. Р. 742.
4. Калмыков Н.Н., Кузьмичев Л.А., Куликов Г.В. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2010. № 4. С. 40.
5. Рождественский С.М., Хренов Б.А., Христиансен Г.Б. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1980. **44**, № 3. С. 643.
6. Вашкевич В.В., Ермаков Г.Г., Ермолов П.Ф. и др. // Ядерная Физика. 1988. **47**, № 4. С. 1054.
7. Вашкевич В.В., Ермолов П.Ф., Калмыков Н.Н. и др. // Ядерная Физика. 1988. **48**, № 5. С. 1349.
8. Зацепин В.И., Чудаков А.Е. // ЖЭТФ. 1962. **42**. С. 1622.
9. Беляев В.А., Чудаков А.Е. // Изв. АН СССР. Сер. физ. **30**, № 10. С. 1700.
10. Baltrusaitis R.M., Cady R., Cassiday G.L. et al. // NIM. 1985. **A 240**. Р. 410.
11. Boyer J.H., Knapp B., Mannel E., Seman M. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 2002. **A 482**. Р. 457.
12. Abraham J., Aglietta M., Aguirre I.C. et al. // Nucl. Instrum. Methods. 2004. **A 523**. Р. 50.
13. Greisen K. // Phys. Rev. Letters. 1966. **16**. Р. 748.
14. Zatsepin G.T., Kuzmin V.A. // JETP Letters. 1966. **4**. Р. 78.
15. Григоров Н.Л., Несторов В.Е., Рапопорт И.Д. и др. // Ядерная Физика. 1970. **11**. С. 1058.
16. Сулаков В.П. // Дисс. ... к. ф.-м. н. М., 1999.
17. Chernov D.V., Kalmykov N.N., Korosteleva E.E. et al. // Int. J. Mod. Phys. A. 2005. **20**. Р. 6799.
18. Haungs A., Apel W.D., Artega J.C. et al. // Proc. 31-st ICRC (Lodz). 2009. icrc0401.
19. Pravdin M.I., Dyachkovsky N.A., Egorov Yu.A. et al. // Proc. 31st ICRC (Lodz). 2009. icrc0282.
20. Abbasi R.U., R.U., Abu Zayyad T., Amman J.F. et al. // Phys. Lett. 2005. **619**. Р. 271.
21. Schussler F. for Auger Collaboration // Proc. 31st ICRC (Lodz). 2009. icrc0114.
22. Biermann P., Strittmatter P. // Astropart. J. 1987. **322**. Р. 643.
23. Abraham J. for Auger Collaboration // Science. 2007. **318**. 9 November.
24. Linsley J., Benson R. // Proc. ICRC 17th. Paris. 1981. **8**, Р. 145.
25. Krenov B.A., Panasyuk M.I. et al. // AIP Conference Proceedings. 2001. **566**. Р. 57.
26. Krenov B.A., Panasyuk M.I., Aleksandrov V.V. et al. // Ядерная Физика. 2004. **67**, № 11. С. 2079.
27. Садовничий В.А., Панасюк М.И., Бобровников С.Ю. и др. // Космич. исследования. 2007. **45**. С. 275.
28. Takahashi Y. for JEM-EUSO Collaboration // J. Phys. Conf. Ser. 2008. **120**. Р. 062013.
29. Krenov B.A. // J. Phys. G. Nucl. Part. Phys. 2002. **29**. Р. 303.

**Extreme energy cosmic rays: perspective of research by space-based detectors****M. I. Panasyuk, B. A. Khrenov<sup>a</sup>***D. V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University,  
Moscow 119991, Russia.**E-mail:* <sup>a</sup>*bkhrenov@yandex.ru.*

Experimental research of high energy cosmic rays in the Institute of Nuclear Physics of MSU was founded by Professor Sergey Nikolaevich Vernov whose birth day century ago we celebrate. In field of extreme energy cosmic rays ( $\sim 5 \cdot 10^{19}$  eV) the cut-off was predicted in works by Greisen, Zatsepin and Kuzmin (GZK). In those works and in later researches the hypothesis of relation between extreme energy cosmic ray energy spectrum and the early stage Universe evolution was developed which opens a great interest to the cosmic ray beyond the GZK limit. However experimental study of such extreme energy cosmic ray particles has met a difficulty of their very low intensity. For development of methods of detection of ultra high energy particles at maximal area (the Earth disc area) the transition from ground-based detectors to space detectors was suggested in recent years. The program of space experiments aiming to study the extreme energy cosmic rays is discussed.

*Keywords:* cosmic rays, high energy, detector, atmosphere fluorescence.

PACS: 95.55.-n.

*Received 2 December 2009.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 4(2010).

**Сведения об авторах**

1. Панасюк Михаил Игоревич — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой физики космоса физического факультета, директор НИИЯФ МГУ; тел.: (495) 939-18-18, e-mail: panasyuk@sinp.msu.ru.
2. Хренов Борис Аркадьевич — докт. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.; тел.: (495) 939-57-34, e-mail: bkhrenov@yandex.ru.