

УДК 524.1, 539.1

## СПЕКТР ПРОТОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

С. В. Борисов, С. А. Воронов, А. М. Гальпер, Л. А. Гришанцева,  
И. А. Данильченко, В. Г. Зверев, А. В. Карелин, С. В. Колдашов,  
С. А. Колдобский, А. А. Леонов, А. Г. Майоров, В. В. Малахов,  
В. В. Михайлов, М. Ф. Рунцо, Ю. Т. Юркин, О. Адриани,  
Г. А. Базилевская, Дж. Барбарино, Р. Белотти, Э. А. Богомолов,  
М. Боецио, В. Бонвичини, М. Бонджи, Л. Бонеки, С. Боттаи, А. Бруно,  
А. Вакки, Е. Вануччини, Г. В. Васильев, Дж. Зампа, Н. Зампа,  
М. Казолино, Д. Кампана, П. Карлсон, Ф. Кафанья, А. Н. Квашнин,  
В. Мальвецци, Л. Марчелли, В. Менн, Э. Мокьютти, Дж. Остерия,  
П. Папини, М. П. Де Паскале, П. Пикоцца, М. Пирс, М. Риччи,  
С. Риччиарини, М. Симон, Н. Де Симоне, Р. Спарволи, П. Спилантини,  
Ю. И. Стожков, В. Ди Феличе, Д. Феделе

*Представлены описание метода и результаты измерения спектра протонов высоких энергий космических лучей в эксперименте ПАМЕЛА. Данный эксперимент проводится на борту ИСЗ и направлен на изучение спектров частиц космических лучей в широком диапазоне энергий. Научное оборудование было выведено на околоземную орбиту в июне 2006 г. и находится там в рабочем режиме по настоящее время. В состав научного оборудования прибора ПАМЕЛА входят различные детекторы, в том числе магнитный спектрометр и позиционно-чувствительный стриповый калориметр. На основе данных этих приборов была выполнена настоящая работа. Диапазон энергии в измеренном спектре протонов от 50 ГэВ до 15 ТэВ.*

**Ключевые слова:** калориметр, космические лучи, протоны.

1. *Введение.* В июне 2006 г. на борту ИСЗ РЕСУРС ДК1 N 1 был выведен на орбиту спектрометр ПАМЕЛА [1]. Эксперимент проводится в настоящее время. Основными задачами эксперимента являются прецизионные измерения энергетических спектров различных компонент космических лучей в околоземном пространстве в широком диапазоне энергий, в том числе и спектра протонов. Как известно, протоны являются доминирующим компонентом космических лучей. В потоке космических лучей протоны составляют 90%. Знание первичного спектра протонов космических лучей является чрезвычайно важным с точки зрения понимания фундаментальных явлений, происходящих в межзвездной среде нашей Галактики. Это, прежде всего, относится к механизмам ускорения космических лучей, процессам, ответственным за происхождение и распространение космических лучей в межзвездном пространстве, а также к распределению самого межзвездного вещества [2]. В дополнение стоит отметить, что знание спектра протонов необходимо для решения и многих других задач. Например, спектр протонов используется для вычисления абсолютных потоков нейтрино в атмосфере, что в свою очередь необходимо для анализа нейтринных осцилляций [3].

Начало измерений первичного спектра протонов высоких энергий в области до  $10^{14}$  эВ, непосредственно в околоземном космическом пространстве, было положено известным экспериментом Н. Л. Григорова на спутниках Протон [4]. С тех пор было проведено еще некоторое количество измерений другими экспериментальными группами, как в атмосфере на аэростатах, так и на наземных ливневых установках [5–8]. Однако на некоторые вопросы не получено до сих пор определенного ответа. Все они, так или иначе, связаны с различными видами особенностей в измеренном протонном спектре. Об одной особенности (наличии колена) в области энергий 1 ТэВ, было сообщено группой Н. Л. Григорова [4]. Тем не менее, надежного экспериментального подтверждения “колена” в этом месте энергетического спектра на сегодняшний день не существует, исследовательские группы получают особенности в разных местах, однако, как правило, выше 10 ТэВ [9–11]. Таким образом, вопрос о существовании и расположении изломов в спектре протонов космических лучей остается открытым. Более того, интервал энергий от 1 до 20 ТэВ является наименее изученной областью с точки зрения измерений протонного спектра. Здесь до сих пор нет хорошего согласия данных, полученных различными экспериментальными группами. Измерения, проводимые на спутнике в околоземном космическом пространстве с помощью новейших детекторов спектрометра ПАМЕЛА, позволят прояснить вопросы о данном энергетическом интервале спектра протонов.

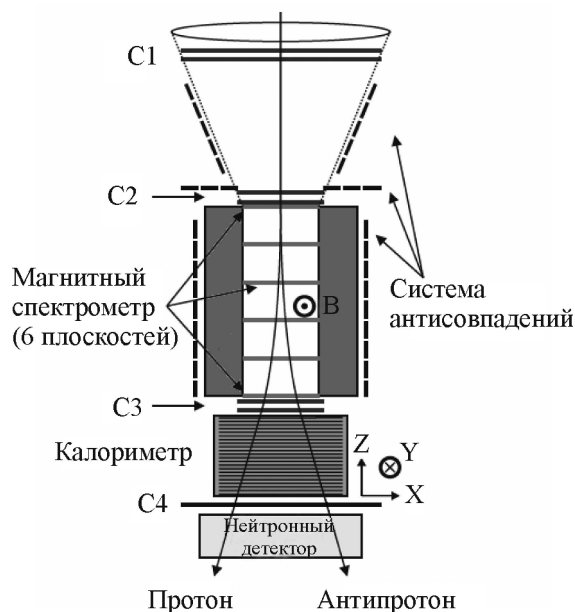


Рис. 1: Общий вид прибора ПАМЕЛА.

2. *Спектрометр ПАМЕЛА.* Экспериментальное оборудование ПАМЕЛА включает в свой состав следующие детекторы (см. рис. 1):

1. Магнитный спектрометр с шестью плоскостями микроstriповых детекторов, служащими для определения знака заряда и импульса частицы.

2. Времяпролетная система (ВПС), состоящая из трех парных сцинтилляционных плоскостей (счетчики С1, С2, С3), которая обеспечивает главный триггер, отбирает частицы, попадающие в аперттуру прибора, измеряет скорость пролета частиц, участвует в определении заряда путем измерения ионизационных потерь в сцинтилляторах.

3. Stripовый многослойный электромагнитный калориметр (толщина 17 рад. длин), идентифицирующий тип частицы, измеряющий энерговыделение, позволяющий определять направление проходящей через прибор частицы.

4. Нижний сцинтилляционный ливневый детектор С4 – измеряет долю энергии ливней, уносимыми частицами каскада, выходящими из калориметра.

5. Нейтронный детектор, помогающий разделять электромагнитные и ядерные каскады по количеству регистрируемых нейтронов, рождаемых при взаимодействиях в калориметре.

6. Систему счетчиков антисовпадений, регистрирующую частицы, попадающие в прибор вне аперттуры, а также выходящие из прибора вторичные частицы.

Подробную информацию об устройстве и назначении каждого детектора можно найти в работах [12–14]. Ниже более детально будут описаны лишь те детекторы, с данными которых непосредственно связана настоящая работа.

Магнитный спектрометр имеет предел при идентификации и определении энергии частиц космических лучей в районе  $\sim 0.5$  ТВ по жесткости, поэтому для расширения измеряемого энергетического диапазона должны быть использованы другие детекторы, входящие в состав спектрометра ПАМЕЛА. В данной работе такая задача была решена с помощью калориметра, который использовался для разделения электромагнитных и ядерных каскадов; для определения по ливню, развившемуся в нем, энергии частиц; и для отбора частиц по восстановленной оси ливня, попадающих в апертуру. Таким образом, учитывались только события, которые дали каскад вторичных частиц в калориметре. Сцинтилляторы ВПС использовались для отделения протонов и электронов от ядер гелия и других многозарядных частиц.

*3. Метод идентификации протонов на фоне ядер гелия и электронов.* Для того чтобы получить спектр протонов космических лучей, необходимо выделить эти частицы из общего потока всех частиц (электронов, позитронов, ядер), падающих на прибор. С первого взгляда может показаться, что доля электронов мала, тем не менее, стоит принять во внимание, что вероятность электронов провзаимодействовать с веществом калориметра много больше, чем для ядер, а в описываемом методе используются именно события с каскадом в калориметре. Так как электроны с меньшей энергией будут имитировать протоны с большей энергией, их относительное (к протонам) количество в отобранных событиях возрастает. Поэтому, учитывая, что практически все 100% электронов провзаимодействуют в первых слоях калориметра, события с высоким энерговыделением (более 8 мип – один мип равен энергии, выделившейся в детекторе при прохождении одной минимально ионизирующей частицы), в этих слоях были исключены, и таким образом устранена значительная примесь электронов [15]. Доля электронов, остающаяся в событиях с каскадом вторичных частиц в калориметре, до и после данного отбора показана на рис. 2, в зависимости от энергии по данным моделирования (GEANT3 GRAMELA [16]).

Остановимся несколько более подробно на устройстве калориметра. Калориметр в эксперименте ПАМЕЛА является дискретным. Он состоит из 44 плоскостей кремниевых позиционно-чувствительных детекторов (каждый 380 мкм толщиной), чередующихся с 22 слоями вольфрамового поглотителя. Каждый вольфрамовый слой имеет толщину 0.26 см, которая соответствует 0.74 рад. длинам. Кремниевые детекторы име-

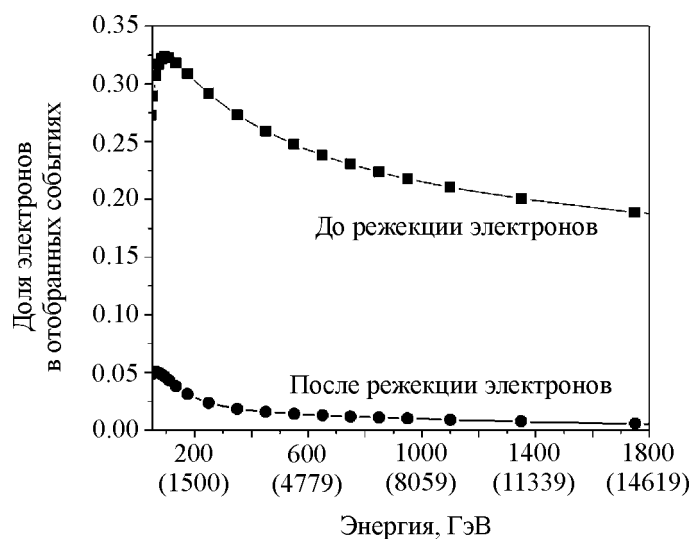


Рис. 2: Доля электронов, остающаяся в событиях с каскадом вторичных частиц в калориметре, до и после отбора по началу развития электромагнитного ливня в калориметре. Данные моделирования. В скобках показана измеряемая энергия протонов (ГэВ), имитируемая электронами с данной энергией (ГэВ).

ют площадь по  $8 \times 8 \text{ см}^2$ , состоят из 32 считывающих полосок, или как их еще называют “стрипов”, шириной 2.4 мм каждый. В одном слое размещено  $3 \times 3$  кремниевых детекторов. Ориентация стрипов в двух последующих слоях является ортогональной, чтобы обеспечить информацию о двух координатах. Площадь чувствительной поверхности калориметра составляет  $24 \times 24 \text{ см}^2$ . Основной единицей структуры калориметра является так называемая “детектирующая плоскость”, состоящая из слоя поглотителя (вольфрама) и примыкающих к нему с двух сторон плоскостей ( $X$  и  $Y$ ) кремниевых детекторов.

Расстояние между двумя последующими “детектирующими плоскостями” составляет приблизительно 6 мм. Две “детектирующие плоскости” образуют “детектирующий модуль”, внутри которого они соединены между собой специальной алюминиевой рамкой. Продольный размер калориметра равен  $\sim 19.5 \text{ см}$ , а полная масса  $\sim 110 \text{ кг}$  [17].

Чтобы выделить ядра гелия, были использованы измерения ионизационных потерь в сцинтилляторах ВПС. Времяпролетная система включает в себя шесть плоскостей пластических сцинтилляторов, которые сгруппированы в три двойные слоя. Кроме того, каждая плоскость сцинтилляторов, в свою очередь, делится на “полоски”, по торцам

которых установлены фотоумножители R5900 фирмы Хамаматсу. В детектор С1 входит 8 полос в одной проекции в одной плоскости и 6 полос в другой проекции в другой плоскости, в детектор С2 – по две полосы соответственно, в то время как в С3 по три полосы. Временное разрешение системы  $\sim 300$  пс [18].

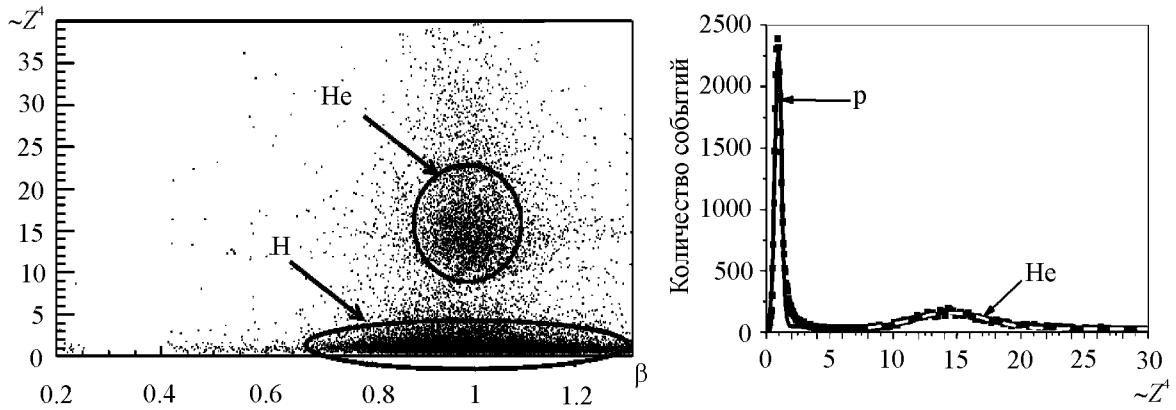


Рис. 3: Режекционные свойства первого слоя детектора С1 ВПС при применении метода перемноженных амплитуд. Слева распределение событий по величине перемноженных амплитуд  $\sim Z^4$  и  $\beta$  – скорости частиц в единицах скорости света, измеренной ВПС (для  $\beta=1$  разрешение плохое). Справа распределение количества событий по величине перемноженных амплитуд. Представлены экспериментальные данные.

Для разделения ядер гелия и протонов по заряду использовался метод перемноженных амплитуд. Амплитуда  $AMP_a$  снимаемого сигнала с фотоумножителя с каждой полоски в любой плоскости любой проекции с одного какого-нибудь торца  $a$  может быть записана в приближении для длинного сцинтиллятора в виде [19]:

$$AMP_a = (A_a) \cdot (Z^2)/\beta^2 \exp(-(L - X)/\lambda),$$

где  $A_a$  – некоторое максимальное значение амплитуды для фотоумножителя с торца  $a$ ,  $Z$  – заряд частицы,  $\lambda$  – длина затухания,  $\beta$  – скорость частицы  $= 1$ ,  $L$  – длина полосы,  $X$  – координата места прохождения частицы через полосу. В то же время амплитуда с другого торца  $b$  записывается в виде:

$$AMP_b = (A_b)(Z^2)/\beta^2 \exp(-X/\lambda),$$

где  $A_b$  – максимальное значение амплитуды для фотоумножителя с торца  $b$ . Тогда при умножении двух амплитуд получается величина, которая зависит только от заряда

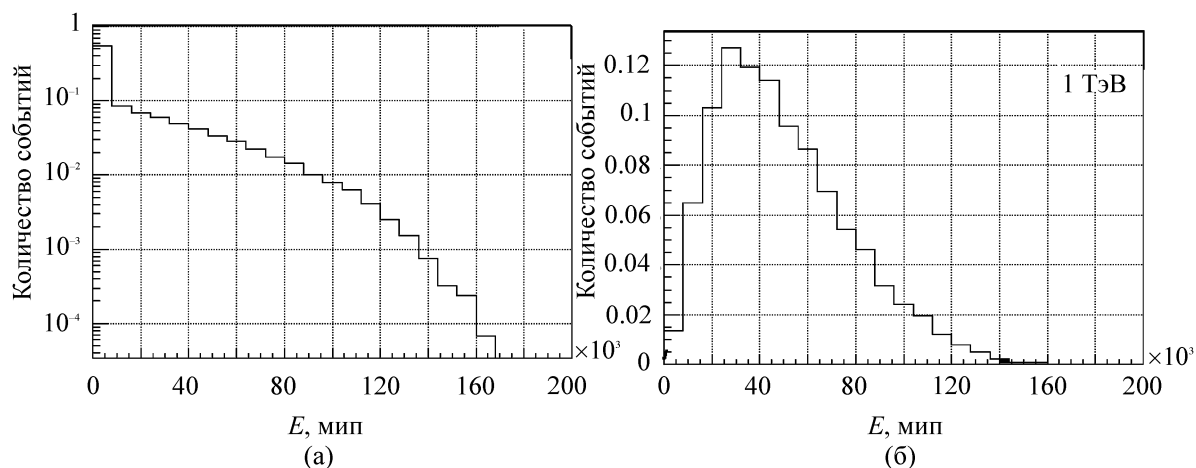


Рис. 4: Распределения по полному энерговыделению в калориметре  $E$  для протонов энергий 1 ТэВ (а) до отбора, (б) после отбора. Данные моделирования. Энерговыделение в калориметре выражено в единицах мип.

частицы и не зависит от координаты:

$$ASQ = AZ^4,$$

где  $A = (A_a A_b) \exp(L/\lambda)$ .

Получившаяся величина произведения амплитуд сигналов с двух торцов полосы прямо пропорциональна заряду частицы, взятому в четвертой степени.

Отбирались только такие события, в которых сработала только одна полоска в каждой плоскости детекторов С1 и С2. Последний детектор С3 не использовался, так как он обеспечивал худшее разрешение по сравнению с другими, что связано с так называемым “обратным током” из калориметра (плоскость детектора С3 находится непосредственно над калориметром) – потоком вторичных частиц в направлении, обратном прилету частицы, который возникает при развитии каскада в калориметре.

На рис. 3 для примера показаны режекционные свойства первой плоскости время-пролетной системы для ядер гелия и протонов на выборке событий из полетных данных. После данного отбора остается лишь 6% ядер гелия от их первоначального количества в потоке космических лучей ядер гелия.

4. *Метод измерения спектра протонов.* На рис. 4(а) показано распределение полного энерговыделения в калориметре, полученное на основе расчетов с помощью пакета программ GEANT3 GRAMELA, для протонов с энергией 1 ТэВ с углами падения на верхнюю поверхность прибора ПАМЕЛА, попадающих в апертуру прибора. Оно по-

строено без какого-либо предварительного отбора событий, поэтому в левой части рисунка для событий с малым энерговыделением можно видеть пик, который обусловлен взаимодействующими протонами и протонами, взаимодействовавшими в нижних слоях калориметра. Энерговыделение выражено в единицах мип.

Чтобы избавиться от взаимодействующих частиц, был произведен предварительный отбор событий, который накладывал определенные ограничения на величины энерговыделений в слоях и стрипах калориметра, связанные с продольным и поперечным развитием каскада вторичных частиц. Также было добавлено требование, чтобы частица попадала в апертуру прибора. Последнее выполнялось путем восстановления направления прилета частицы, с помощью метода наименьших квадратов, причем исключались события с плохо восстановленной осью. Подробнее данный вопрос рассмотрен в работах [20–22]. Для каждого отдельного события была определена плоскость начала каскада вторичных частиц. Дополнительно были отобраны только те события, у которых ливень начинался в верхней половине калориметра. Данное требование существенно по той причине, что чем глубже начался ливень, тем больше доля недетектируемой энергии каскада, и тем, следовательно, хуже энергетическое разрешение. На рис. 4(б) представлено распределение по полному энерговыделению в калориметре для отобранных таким образом событий для протонов с энергией 1 ТэВ.

Если применить такой параметр как отношение полного энерговыделения в калориметре  $E_{\text{tot}}$  к числу сработавших стрипов  $N_{\text{hit}}$ , в дополнение к величине полного энерговыделения, то распределение частиц по такому параметру получается более симметричным, и может быть аппроксимировано кривой Гаусса для всех энергий (см. рис. 5).

Зависимость относительного количества отобранных протонов от энергии после вышеперечисленного отбора представлена на рис. 6.

Для определения энергии протонов бралось значение величины отношения полного энерговыделения к числу сработавших стрипов, и использовались его распределения в зависимости от первичной энергии протонов. Поскольку энергетическое разрешение плохое, то для восстановления спектра протонов из спектра выделенных событий по данным калориметра применялись методы, часто используемые в подобных случаях, когда требуется решить задачу, относящуюся к классу некорректно поставленных задач. В каждом случае математически задача восстановления спектров излучения сводится к нахождению решения интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода [23]. Для ее решения необходима добавочная априорная информация, которая должна быть до-



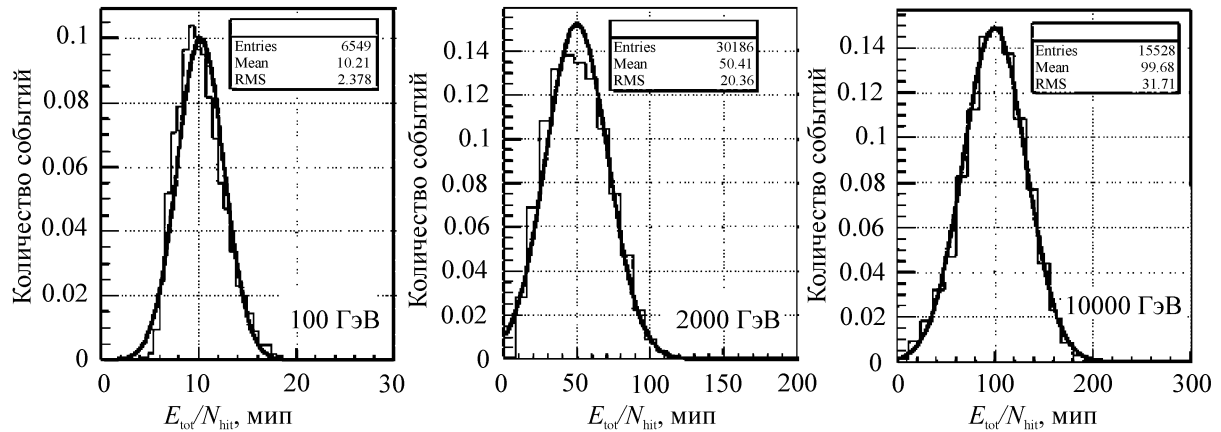


Рис. 5: Распределение по величине отношения полного энерговьделения в калориметре к количеству сработавших стрипов для протонов с энергией 100, 2000, 10000 ГэВ. Данные моделирования.

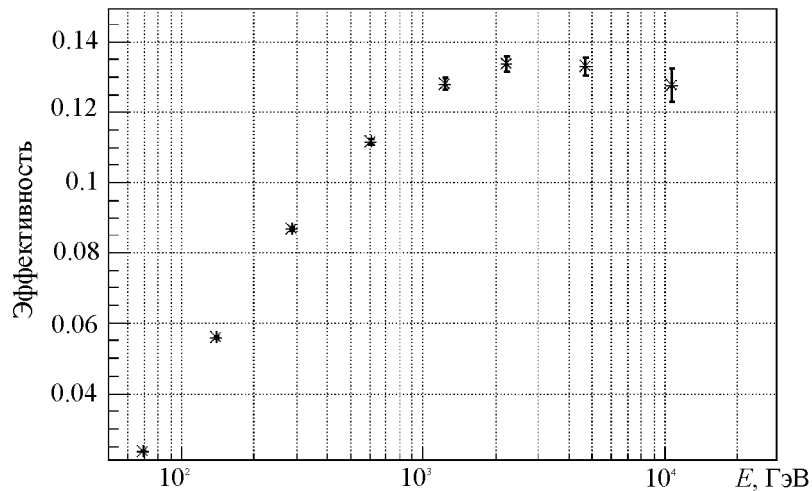


Рис. 6: Относительное количество протонов, оставшихся после отбора, в зависимости от их энергии.

полнительно задана – функции отклика, примеры которых показаны на рис. 5 для фиксированных энергий. Такая информация была получена путем моделирования степенного спектра протонов с показателем 2 при попадании частиц в апертуру прибора.

Применялась итерационная методика, подробно описанная в работе [24], основанная на использовании теоремы Байеса. Она учитывает распределения вероятностей того, что в то время как величина измеренной первоначальной энергии протона находится

в одном энергетическом интервале, истинная величина энергии может находиться в другом интервале. В соответствии с этим методика корректирует количество событий в каждом энергетическом интервале.

Абсолютный поток протонов был определен путем деления восстановленного приборного спектра на экспозицию –  $1.04 \cdot 10^4 \text{ м}^2 \text{ с стр.}$

5. *Результаты.* На рис. 7 полученные результаты приведены в сравнении с результатами других экспериментов, как наземных (Eas-Top [8], KASCADE [25], M. Ichimura [7]), так аэростатных и спутниковых (CAPRICE98 [26], M. J. Ryan [6], ATIC [5], ПРОТОН (Н. Л. Григоров) [4], (И.П. Иваненко) [27]). Показаны спектры, умноженные на энергию в степени 2.7.

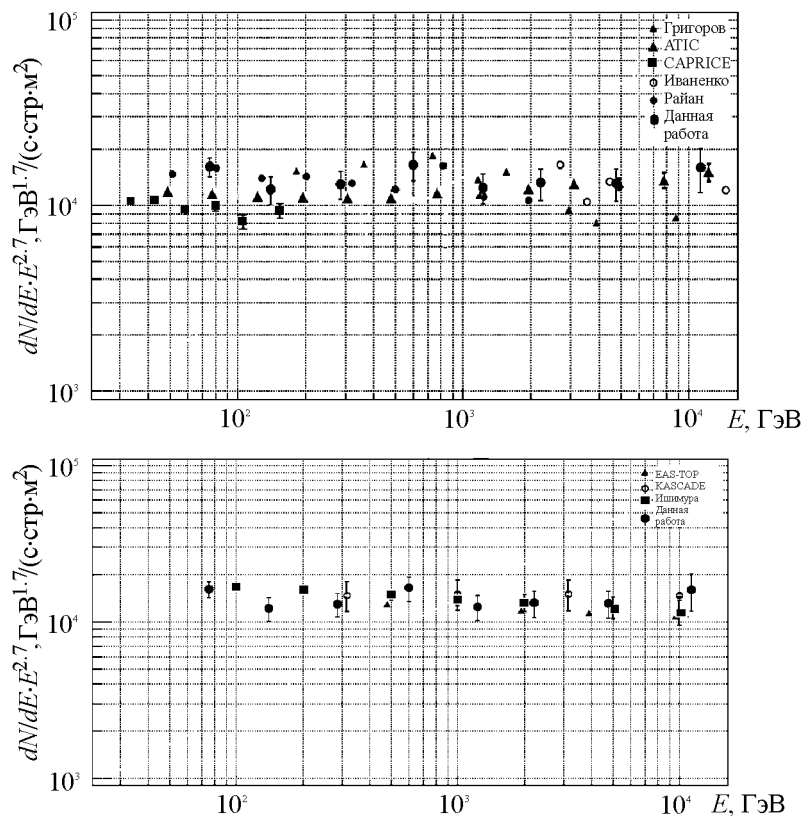


Рис. 7: Полученный спектр протонов в сравнении с данными аэростатных и спутниковых (а), и наземных экспериментов (б).

Необходимо отметить хорошее согласие с данными наземных экспериментов во всей измеряемой области от 50 до 15000 ГэВ, если пренебречь незначительными систематическими сдвигами, а также с экспериментом ATIC в области энергий выше 1.2 ТэВ.

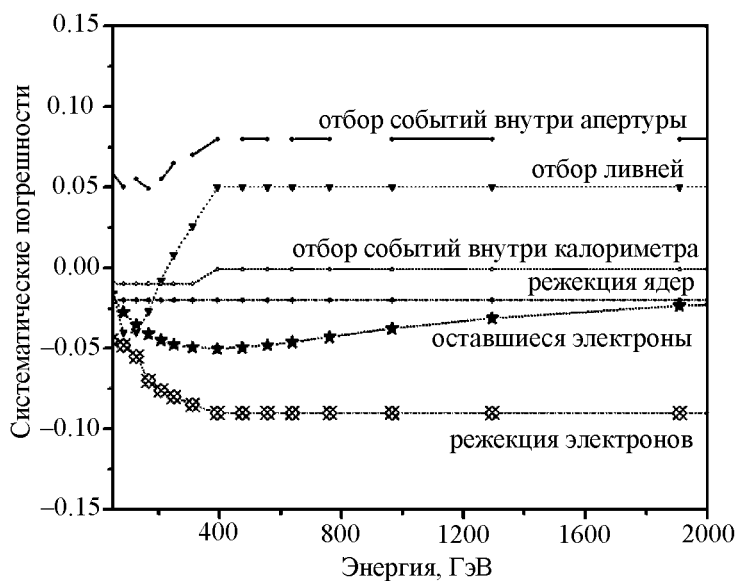


Рис. 8: Выше нуля отложены систематические погрешности, которые могут занижать измеренный поток протонов, ниже нуля отложены систематические погрешности, которые могут завышать измеренный поток протонов по сравнению с истинным.

В области более низких энергий приведенные данные лучше согласуются с результатами Н. Л. Григорова. Систематические ошибки в зависимости от энергий протонов показаны на рис. 8 и не превышают 15%. Систематические ошибки в основном связаны с расхождением в модельных и экспериментальных данных количества событий, оставшихся после каждого из вышеперечисленных отборов. Они получены с помощью сравнения результатов моделирования с данными магнитного спектрометра до энергий 500 ГэВ, а затем экстраполированы в область более высоких энергий.

*б. Заключение.* Данная работа посвящена измерению спектра протонов в одном из самых малоисследованных энергетических диапазонов – в области 1–10 ТэВ. Измерения выполнены в околоземном космическом пространстве. Это первое прямое измерение на спутнике спектра протонов в данной энергетической области спустя почти 40 лет с того момента, как было заявлено о так называемом “колене” – загибе спектра протонов при энергии около 1 ТэВ, зарегистрированном в первых экспериментах серии “Протон”. В настоящей работе представлены результаты измерений спектра протонов 50–15000 ГэВ на борту ИСЗ за более, чем два года наблюдений. Можно сделать вывод, что заметного излома спектра протонов в диапазоне 1–2 ТэВ не наблюдается. Возможно в

диапазоне 0.5–1 ТэВ имеется некоторая особенность в спектре, говорящая об “избытке” протонов в указанной энергетической области.

Автор поддерживается РФФИ, грант 10–02–01301а. Работа выполнена в рамках ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] P. Picozza et al., *APh* **27**, 296 (2007).
- [2] E. S. Seo and V. S. Ptuskin, *ApJ* **431**, 705 (1994).
- [3] T. K. Gaisser, *Nucl. Phys. B* **77**, Issues 1-3, 133 (1999).
- [4] Н. Л. Григоров, В. Е. Нестеров, И. Д. Рапопорт и др., *Космич. исслед.*, **5**(3), 395 (1967).
- [5] А. Д. Панов, Дж. Х. Адамс, Х. С. Ан, *Известия РАН, Серия Физическая* **73**(5), 602 (2009).
- [6] M. J. Ryan, J. F. Ormes, and V. K. Balasubrahmanyam, *Phys. Rev. Lett.* **28**, 985 (1972).
- [7] M. Ichimura et al., *Phys. Rev. D*, **48**(5), 1950 (1993).
- [8] R. Adinolfi et al. (EAS-TOР Collaboration), *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.* **A420**, 117 (1999).
- [9] V. I. Zatsepin et al., *Proc. 23<sup>rd</sup> Int. Cosmic Ray Conf. (University of Calgary, Calgary, Canada, 1993)*, **2**, 13 (1993).
- [10] M. Amenomori, *Phys. Rev. D*, **62**, 112002 (2000).
- [11] H. Ulrich et al., *Proc. 27<sup>th</sup> Int. Cosmic Ray Conf. Hamburg 2001 (Copernicus Gesellschaft, Katlenburg-Lindau, 2001)*, vol. 1, p. 97.
- [12] S. Ricciarini, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.* **A582**, 892 (2007).
- [13] S. Straulino et al., *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, **A556**, 100 (2006).
- [14] Y. I. Stozhkov, *Proc. 30<sup>rd</sup> Int. Cosmic Ray Conf. (Merida, 2007)* – [http://statistics.roma2.infn.it/~morselli/Stozhkov\\_ICRC0249.pdf](http://statistics.roma2.infn.it/~morselli/Stozhkov_ICRC0249.pdf).
- [15] M. Boezio et al., *Astrpart. Phys.* **26**, 111 (2006).
- [16] <http://www.ba.infn.it/~ambriola/gpamela/>.
- [17] M. Boezio et al., *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.* **A487**, 407 (2002).
- [18] W. Menn, *Proc. 30<sup>rd</sup> Int. Cosmic Ray Conf. (Merida) (2007)* – <http://indico.nucleares.unam.mx/getFile.py/access?contribId=495&sessionId=8&resId=0&materialId=paper&confId=4>.
- [19] С. А. Бунятов и др., *Письма в ЭЧАЯ* **4**(6), 847 (2007).
- [20] А. В. Карелин, С. А. Воронов, Г. И. Васильев, М. Ф. Рунцо, *Космические исследования* **48**(3), 1 (2010).
- [21] А. В. Karelin, *31<sup>rd</sup> Int. Cosmic Ray Conf. (Lodz) HE.0493 (2007)* – <http://www.srl.utu.fi/AuxDOC/kocharov/ICRC2009/pdf/icrc0493.pdf>.
- [22] А. В. Карелин, С. В. Борисов, С. А. Воронов и др., *Письма в ЭЧАЯ* **7**(1), 8 (2010).

- [23] В. Ю. Теребиж, *Введение в статистическую теорию обратных задач* (М., Физматлит, 2005).
- [24] G. D. Agostini, Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A **362**, 487 (1995).
- [25] T. Antoni, W. D. Apel, and F. Badea, ApJ **612**, 914 (2004).
- [26] M. Boezio, P. Carlson, T. Francke, et al., ApJ **518**, 457 (1999).
- [27] И. П. Иваненко и др., Письма в ЖЭТФ **48**, 468 (1988).

Поступила в редакцию 6 июля 2010 г.