

Е.Е.Коростелева, Л.А.Кузьмичев, В.В.Просин,  
Д.В.Чернов, И.В.Яшин (НИИЯФ МГУ),  
Н.М.Буднев, О.А.Гресс, Т.И.Гресс, Л.В.Паньков,  
Ю.В.Парфенов, Ю.А.Семеней (НИИПФ ИГУ),  
Р.В.Васильев, Б.К.Лубсандоржиев,  
А.И.Пафилов, П.Г.Похил (ИЯИ РАН),  
Т.Шмидт, К.Шпиринг (ДЕЗИ-Цойтен, Германия)

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР И МАССОВЫЙ  
СОСТАВ ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ  
ПО ДАННЫМ ЧЕРЕНКОВСКОЙ УСТАНОВКИ  
ШАЛ ТУНКА**

Препринт НИИЯФ МГУ - 2004 - 2/741

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

им. М.В. ЛОМОНОСОВА

---

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ

ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА

Е.Е.Коростелева, Л.А.Кузьмичев, В.В.Просин,  
Д.В.Чернов, И.В.Яшин (НИИЯФ МГУ),  
Н.М.Буднев, О.А.Гресс, Т.И.Гресс, Л.В.Паньков,  
Ю.В.Парфенов, Ю.А.Семеней (НИИПФ ИГУ),  
Р.В.Васильев, Б.К.Лубсандоржиев,  
А.И.Пафилов, П.Г.Похил (ИЯИ РАН),  
Т.Шмидт, К.Шпиринг (ДЕЗИ-Цойтен, Германия)

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР И МАССОВЫЙ СОСТАВ  
ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПО ДАННЫМ  
ЧЕРЕНКОВСКОЙ УСТАНОВКИ ШАЛ ТУНКА**

Препринт НИИЯФ МГУ - 2004 - 2/741

УДК 537.591

Chernov D.V., Korosteleva E.E., Kuzmichev L.A., Prosin V.V., Yashin I.V. (SINP MSU), Budnev N.M., Gress O.A., Gress T.I., Pankov L.V., Parfenov Yu.V., Semenev Yu.A. (API ISU), Vasiliev R.V., Lubsandorzhiev B.K., Panfilov A.I., Pohil P.G. (INR RAN), Schmidt T., Spiering C. (DESY-Zeuthen, Germany)

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

**PRIMARY COSMIC RAYS ENERGY SPECTRUM  
AND MASS COMPOSITION BY THE DATA  
OF TUNKA EAS CHERENKOV ARRAY**

Preprint SINP MSU - 2004 - 2/741

**Abstract**

The new function fitting the Cherenkov light lateral distribution more correctly than it was before is used to reconstruct the EAS parameters. The primary cosmic rays differential energy spectrum with the better resolution in the range from 0.5 to about 50 PeV is presented. The mean primary mass composition is estimated.

**Е.Е.Коростелева, Л.А.Кузьмичев, В.В.Просин, Д.В.Чернов, И.В.Яшин  
(НИИЯФ МГУ), Н.М.Буднев, О.А.Гресс, Т.И.Гресс, Л.В.Паньков,  
Ю.В.Парфенов, Ю.А.Семеней (НИИПФ ИГУ), Р.В.Васильев,  
Б.К.Лубсандоржиев, А.И.Пафилов, П.Г.Похил (ИЯИ РАН), Т.Шмидт,  
К.Шпиринг (ДЕЗИ-Цойтен, Германия)**

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР И МАССОВЫЙ СОСТАВ  
ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПО ДАННЫМ  
ЧЕРЕНКОВСКОЙ УСТАНОВКИ ШАЛ ТУНКА**

Препринт НИИЯФ МГУ - 2004 - 2/741

**Аннотация**

Для восстановления параметров ШАЛ применена новая функция, позволяющая более точно, чем ранее, описывать пространственное распределение черенковского света. Представлен дифференциальный энергетический спектр первичных космических лучей в диапазоне энергий от 0.5 ПэВ до 50 ПэВ с улучшенным энергетическим разрешением. Оценен средний массовый состав первичных космических лучей.

©НИИЯФ МГУ, 2004

©Н.М.Буднев, Р.В.Васильев, О.А.Гресс, Т.И.Гресс,  
Е.Е.Коростелева, Л.А.Кузьмичев, Б.К.Лубсандоржиев,  
А.И.Панфилов, Л.В.Паньков, Ю.В.Парфенов, П.Г.Похил,  
В.В.Просин, Ю.А.Семеней, Д.В.Чернов, Т.Шмидт,  
К.Шпиринг, И.В.Яшин

# Введение

Тункинская установка состоит из 25-ти интегральных черенковских детекторов на базе фотоприемников КВАЗАР-370 и четырех детекторов формы импульсов черенковского света на базе фотумножителей Thorn-EMI D668 с коническими отражателями. Интегральные детекторы образуют квадратную сеть с шагом 85 м и полным размером  $340 \times 340$  м<sup>2</sup>. Более подробное описание установки приведено в работе [1]. Основное отличие настоящей работы от предыдущих заключается в применении при восстановлении параметров ШАЛ новой фитирующей функции пространственного распределения черенковского света и связанных с этим новой методики определения энергии и глубины максимума ШАЛ. В работе получен уточненный энергетический спектр первичных космических лучей (ПКЛ) в диапазоне от 0.5 до 50 ПэВ и оценки среднего состава ПКЛ, полученные из оценок средних глубин максимумов ШАЛ для этих энергий.

## Детальная форма функции пространственного распределения

Для анализа формы ФПР черенковского света ШАЛ, как и любой другой компоненты, необходимо, чтобы положение оси ШАЛ было определено с помощью независимых детекторов. Только в этом случае наблюдаемая форма ФПР будет независима от априорных предположений о пробной функции. Такая схема эксперимента по исследованию ФПР черенковского света в рассматриваемом диапазоне энергий ШАЛ была реализована в работах в Самарканде [2] в 1980-1983 гг, в Якутске [3] в 1984-1988 гг и в Гран Сассо (Италия) [4] в 1998-2000 гг. К сожалению, во всех случаях количество детекторов было недостаточно для получения подробных индивидуальных ФПР. Больше всего детекторов 12 было в Самарканде. В Якутске в индивидуальных событиях участвовало всего 4 - 5 детекторов. Столько же точек было в эксперименте QUEST на установке EAS-TOP в Гран Сассо (Италия). Кроме того, для анализа ФПР важно иметь надежные расчетные функции, т.к. экспериментальные данные всегда фрагментарны, т.е. получены только для некоторых расстояний, некоторых энергий и некоторых зенитных углов. А конечным результатом анализа ФПР должна быть единая фитирующая функция для любых расстояний от оси, любых энергий и любых зенитных углов. Такая функция необходима для восстановления основных параметров ШАЛ при обработке.

Анализ нескольких сотен расчетных ФПР, полученных по программе CORSIKA, для двух уровней в атмосфере (2000 м и 675 м над у.м.), показал, что, независимо от уровня, ФПР демонстрируют следующие характерные особенности:

- 1) Вблизи оси до расстояний около  $R=30$  м функция ведет себя как  $1/R$
- 2) От 30 м до резкого изменения на некотором переменном расстояниях  $R_{kn}$  функция лучше всего фитируется видом  $\exp(-R/R_0)$
- 3) ФПР на расстояниях от  $R_{kn}$  до 250 м имеет степенной вид  $R^{-2.2}$ .

В конечном итоге удалось подобрать следующее представление фитирующей функции, состоящее из двух ветвей, но с одним переменным параметром формы  $P$ :

$$Q(R) = \begin{cases} Q_{kn} \cdot \exp((R_{kn} - R) \cdot (1 + 2/R)/R_0), & R < R_{kn} \\ Q_{kn} \cdot (R_{kn}/R)^{2.2}, & R \geq R_{kn} \end{cases} \quad (1)$$

$$R_0 = 10^{2.83 - 0.2 \cdot P},$$

$$R_{kn} = 200 - 20 \cdot P,$$

Конкретные параметры в формуле 1 приведены для уровня 675 м, соответствующего Тункинской долине. Некоторые параметры для уровня 2000 м, соответствующего установке EAS-TOP, немного отличаются от приведенных здесь (см [2]).

Подчеркнем новый характер флуктуаций формы ФПР, впервые отмеченный нами в работе [4]. Для пояснения характера флуктуации ФПР мы воспроизводим здесь рисунок из работы [4] (см. рис 1), где приведены примеры индивидуальных ФПР, разыгранные по программе CORSIKA для фиксированной энергии и нескольких зенитных углов от  $0^\circ$  до  $39^\circ$ .

При изменении положения максимума ШАЛ изменяется параметр  $P$ , в результате чего одновременно меняется расстояние точки излома ФПР от оси и наклон первой экспоненциальной ветви ФПР. Вторая ветвь ФПР при этом практически не изменяется, и любая плотность черенковского света на ней может служить мерой первичной энергии. Для определенности можно выбрать минимальное расстояние от оси,

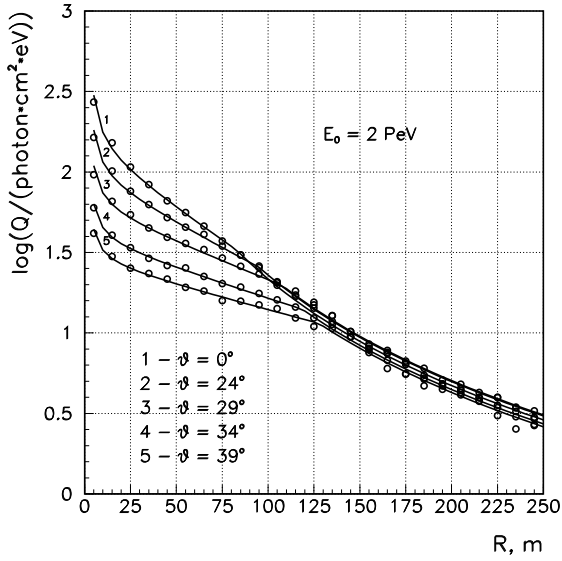


Рис. 1: Фитирование расчетных ФПР формулой (1)

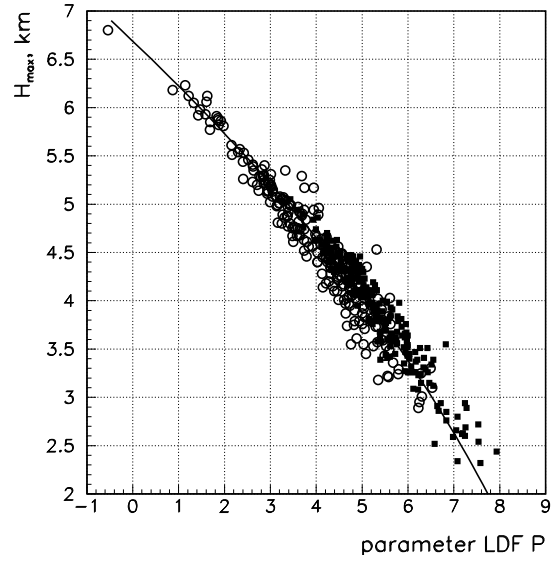


Рис. 2: Расчетная связь параметра  $P$  с расстоянием до максимума ливня  $H_{max}$

заведомо большее любого наблюдаемого значения  $R_{kn}$ , например, 175 м. Тогда для определения энергии первичной частицы может быть использовано выражение:

$$\log_{10}(E_0/TeV) = \log_{10}Q_{175} - 2.53 + o(P) \quad (2)$$

Т.е. энергия пропорциональна плотности черенковского света на расстоянии 175 м от оси с малой поправкой, зависящей от  $P$ :

$$o(P) = \begin{cases} 0 & P < 3.5 \\ 0.02 \cdot (P - 4.5), & 3.5 < P < 5.8 \\ 0.32 \cdot (P - 5.8) + 0.026, & P > 5.8 \end{cases}$$

Параметры  $Q_{175}$  и  $P$  определялись фитированием с помощью функции (1) 480 расчетных ФПР для четырех энергий (1,5,10 и 20 ПэВ), трех зенитных углов (0,15 и 25 градусов) и двух сортов первичных частиц (протоны и железо). Применение выражения 2 ко всей совокупности расчетных ФПР при равном количестве протонов и железа дает теоретическую точность определения энергии 12%. Выражение 2 завышает энергию для протонов на 10% и на столько же занижает ее для первичных ядер железа при энергиях более 5 ПэВ. Для энергии 1 ПэВ разница в оценке энергии для протонов и железа возрастает до 40%

Рис. 2 демонстрирует расчетную связь параметра  $P$  с расстоянием до максимума ШАЛ в километрах. Все точки ложатся на единую кривую, независимо от энергии, зенитного угла и сорта первичной частицы. Это показывает, что параметр  $P$  действительно определяется достаточно устойчиво и может служить мерой положения максимума. Если пересчитать от расстояния до максимума к глубине максимума в единицах  $г/см^2$ , то теоретическая точность измерения максимума по этому методу оказывается равной 20  $г/см^2$ .

## Восстановление параметров ШАЛ

Все время работы установки было разделено на стабильные периоды, когда не менялось количество работающих детекторов и усиление каждого из детекторов. Относительная калибровка детекторов проводилась путем сравнения интегральных спектров показаний детекторов за каждый стабильный период работы с эталонным спектром и составления таблицы относительных коэффициентов преобразования для каждого из 25 детекторов и для каждого из 90 периодов стабильной работы.

Путем прямых измерений и построения спектров показаний детекторов за все время наблюдений были оценены верхние пороги насыщения детекторов. При этом самым слабым звеном оказались предусилители. Детекторы, достигшие насыщения, из обработки исключались. Это определило верхний предел измерений, который оказался около 50 ПэВ.

По измеренным плотностям потока света в детекторах восстанавливаются в каждом событии координаты следа оси на плоскости, параметр индивидуальной функции пространственного распределения (ФПР)  $P$  и плотность потока света на расстоянии 175 м от оси ШАЛ  $Q_{175}$ . Для достижения лучшей точности в измеренной энергии абсолютная калибровка была произведена путем построения интегрального энергетического спектра и нормировки его на энергетический спектр, полученный по данным черенковских детекторов в эксперименте QUEST [4]. В этом эксперименте ШАЛ регистрировались и их энергия определялись независимо сцинтилляционной установкой EAS-TOP и системой из 5-ти черенковских детекторов, аналогичных детекторам установки ТУНКА. Энергия по показаниям сцинтилляторов определялась умножением числа заряженных частиц на коэффициент, зависящий от параметра функции пространственного распределения черенковского света в соответствии с расчетом по программе CORSIKA. При таком способе оценка энергии практически не зависит от предположений о составе первичного излучения. Калибровочный коэффициент определялся как среднее отношение энергии, найденной по черенковскому свету к энергии, найденной по заряженной компоненте ШАЛ. Затем все индивидуальные энергии, определенные по черенковскому свету, были поправлены умножением на калибровочный коэффициент, и по этим данным построен интегральный энергетический спектр ШАЛ. Интенсивность этого спектра  $\lg(I/(c^{-1}\cdot m^{-2}\cdot sr^{-1})) = -6.68 \pm 0.02$  для  $\lg(E_0/\text{ПэВ}) > 3.5$ .

В этой точке и проводилась нормировка спектра Тункинской установки путем подбора корректирующего коэффициента для найденной энергии. Точность нормировки не хуже 2%.

Относительная точность измерения энергии (энергетическое разрешение) была оценена при моделировании эксперимента QUEST [4] и составила лучше 27% для любых предположений о составе первичного излучения.

## Дифференциальный энергетический спектр

В спектр включены данные, полученные за первые 200 часов работы установки зимой 2000-2001 г. За это время зарегистрировано около 1.5 млн. событий. После восстановления параметров в спектр отбирались события с зенитными углами  $\theta \leq 25^\circ$  и положением оси в пределах выбранной эффективной области. Эффективной областью считался круг радиусом 135 м вокруг центра триггерной четверки детекторов. Минимальными по порогу триггерными комбинациями являются 4 квадрата со стороной 85 м, окружающие центр установки. Таким образом, эффективная область представляет собой результат наложения от 1 до 4-х кругов (в зависимости от работы триггерных детекторов), центры которых сдвинуты на 60 м относительно центра установки и помещены в центры триггерных квадратов. Для выбранной таким образом эффективной области 100% эффективность достигается при энергии более 0.8 ПэВ. Спектр, начиная с этой энергии, содержит 78720 событий.

Чтобы оценить спектр при минимально достижимой энергии были отобраны события с зенитными углами менее  $\theta \leq 12^\circ$  и эффективным радиусом 60 м. При этом порог 100% эффективности был понижен до 0.5 ПэВ. В целом интенсивность спектра по меньшей площади и телесному углу не отличается от основного в пределах статистических ошибок, начиная с порога основного спектра.

Комбинированный дифференциальный энергетический спектр первичного космического излучения (ПКЛ), в котором первые 3 точки относятся к уменьшенной эффективной площади и телесному углу, приведен на рис. 3. Спектр имеет резкий излом при энергии около 3 ПэВ. Ниже излома, т.е. от порога до энергии ПэВ спектр имеет степенной вид с показателем  $\gamma = 2.65 \pm 0.01$ . При энергии выше 6 ПэВ спектр также может быть аппроксимирован степенной функцией с показателем  $\gamma = 3.07 \pm 0.05$ . В области энергий от 3-х до 6-ти ПэВ спектр единой степенной функцией не описывается.

Для сравнения на том же рисунке показан спектр установки МГУ из работы [5], содержащий максимальное из всех известных работ число событий, т.е. имеющий минимальные из всех существующих в этой области энергий статистические ошибки. Спектр получен пересчетом от спектров по числу заряженных частиц. Для улучшения энергетического разрешения в этой работе число частиц сначала пересчитывалось к вертикали с учетом пробега поглощения в атмосфере и лишь затем к энергии. По интенсивности спектры хорошо согласуются во всем диапазоне энергий, где они перекрываются.

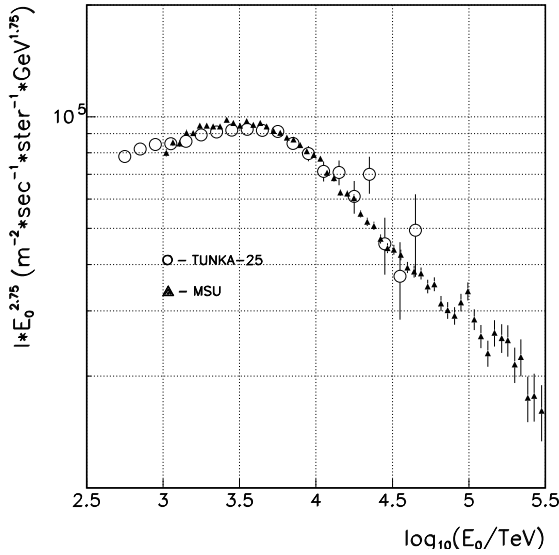


Рис. 3: Дифференциальный энергетический спектр.

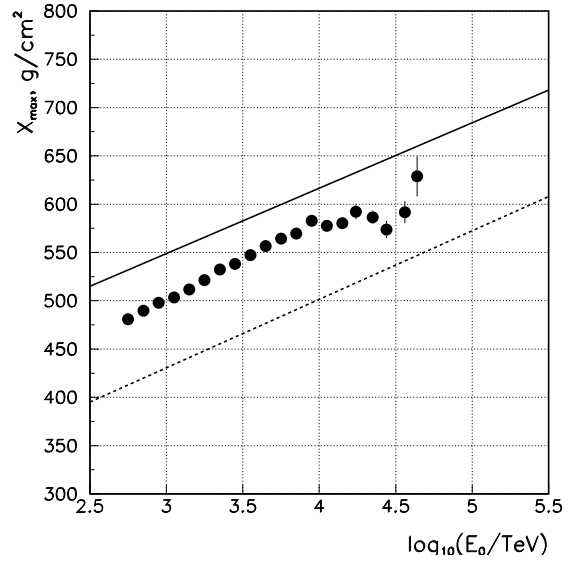


Рис. 4: Экспериментальная зависимость средней глубины максимума ШАЛ от энергии.

## Оценка состава первичного космического излучения

На рисунке 4 приведена зависимость средней глубины максимума от энергии. На том же рисунке приведены расчетные зависимости для первичных протонов и ядер железа. Расчеты проводились по современной версии модели КГС. Данные, приведенные на этом рисунке, можно преобразовать к зависимости среднего логарифма атомного номера от энергии. При этом необходимо учитывать отмеченное выше небольшое различие в оценке энергии для протонов и железа. Это различие почти не сказывается на оценке суммарного спектра, но для сложного состава дает систематическое смещение оценки  $\ln A$  в меньшую сторону примерно на 0.5. Построенная таким образом зависимость  $\ln A$  от энергии приведена на рис. 5. В области энергий от порога установки и до  $10^{16}$  происходит медленное облегчение состава с ростом энергии, затем тенденция изменения состава меняется на противоположную, однако в пределах статистических ошибок сложно оценить, какова скорость утяжеления состава. При энергии излома или колена в спектре по приведенным данным состав обогащен легкими ядрами. Последний вывод совпадает с выводами ряда работ, выполненные с использованием черенковской методики. Однако есть и ряд работ, в основном по измерению соотношения потоков мюонов и электронов в ШАЛ, в которых делается противоположный вывод о монотонном утяжелении состава в рассматриваемом диапазоне энергий. По-видимому, требуются дальнейшие усилия по анализу экспериментальных данных.

## Заключение

Внедрена новая фитирующая функция пространственного распределения черенковского излучения ШАЛ.

Получен энергетический спектр ПКЛ в диапазоне от 0.5 до 50 ПэВ.

По индивидуальным ФПР черенковского света получена зависимость средней глубины максимума ШАЛ от энергии.

Из зависимости средней глубины ШАЛ от энергии получена зависимость среднего логарифма атомного номера первичных частиц от энергии. Согласно этой зависимости состав первичного космического излучения меняется медленно в сторону облегчения в диапазоне от 0.5 до 10 ПэВ, а при больших энергиях наблюдается тенденция к утяжелению.

Авторы выражают благодарность профессору Джанни Наварре и всем участникам коллаборации EASTOP за предоставленную возможность провести калибровочный эксперимент QUEST на установке EASTOP, а также использовать для анализа банк данных, наигранных по программе CORSIKA в Туринском университете. Настоящая работа поддержана в части обработки данных грантом РФФИ (01-

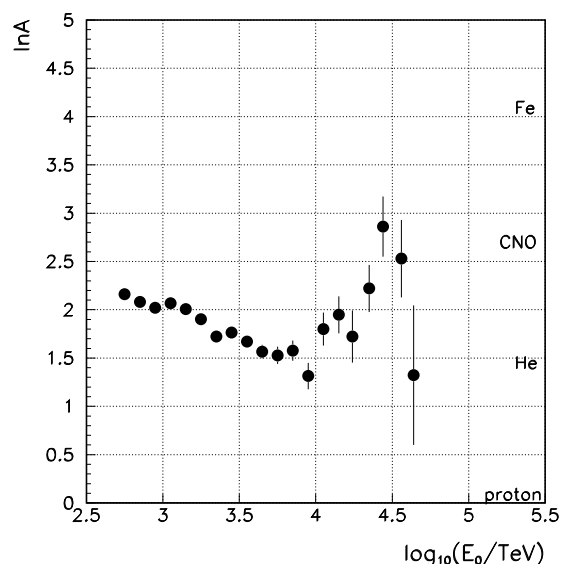


Рис. 5: Зависимость среднего  $\ln A$  от энергии.

02-17788), в части усовершенствования и эксплуатации установки грантами РФФИ (01-02-17234) и РФФИ (02-02-17162).

## Литература

1. Budnev N. et al., Proc. 27th ICRC, 2001, Hamburg, 1, 581
2. Aliev N. et al., Proc. 19th ICRC, 1985, La Jolla, 7, 107
3. Ефимов Н.Н. и др., Материалы Всесоюзной Конференции по Космическим Лучам, Алма-Ата, 1, 17
4. EAS-TOP Collaboration and Korosteleva E.E., Kuzmichev L.A., Prosin V.V. Proc. 28th ICRC, 2003, Tsukuba, Japan, 1, 89
5. Е.А.Вишневская и др., Изв. РАН, сер. физ., 2002, 66, 11, 1566



Елена Евгеньевна Коростелева, Леонид Александрович Кузьмичев, Василий Владимирович Просин, Дмитрий Валентинович Чернов, Иван Васильевич Яшин, Николай Михайлович Буднев, Олег Анатольевич Гресс, Татьяна Ивановна Гресс, Леонид Ввасильевич Паньков, Юрий Викторович Парфенов, Юрий Адрамович Семеней, Роман В.Васильев, Баярто Константинович Лубсандоржиев, Андрей Иванович Пафилов, Павел Григорьевич Похил, Торстен Шмидт, Кристиан Шпиринг

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР И МАССОВЫЙ СОСТАВ  
ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПО ДАННЫМ  
ЧЕРЕНКОВСКОЙ УСТАНОВКИ ШАЛ ТУНКА**

Препринт НИИЯФ МГУ - 2004 - 2/741

Работа поступила в ОНТИ 20.01.2004г.

**ИД №00545 от 06.12.1999**

**Издательство УНЦ ДО**

117246, Москва, ул. Обручева, 55А

Тел./факс (095) 718-6966, 718-77-67, 718-77-85

e-mail: [izdat@abiturcenter.ru](mailto:izdat@abiturcenter.ru)

<http://abiturcenter.ru/izdat>

Гигиенический сертификат №77.99.2.925.П.9139.2.00 от 24.02.2000

Налоговые льготы - Общероссийский классификатор продукции

ОК-005-93, том 1 - 953000

Подписано в печать \_\_\_\_ . \_\_\_\_ .2004г. Формат 60x90/16

Усл.печ.л. 0,5

Тираж 30 экз. Заказ №

Отпечатано в Мини-типографии УНЦ ДО

<http://abturcenter.ru/print>

в полном соответствии с качеством

предоставленного оригинал-макета