

УДК 539.1.074.4

ЛУННЫЙ ОРБИТАЛЬНЫЙ РАДИОДЕТЕКТОР И ПОТЕНЦИАЛ РЕГИСТРАЦИИ ЧАСТИЦ УЛЬТРАВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

В. А. Рябов, Г. А. Гусев, Б. Н. Ломоносов,
Н. Г. Полухина, В. А. Чечин

В работе рассмотрены проблемы регистрации космических лучей и нейтрино ультравысоких энергий. Показано, что для обнаружения частиц с самыми высокими существующими в природе энергиями, наиболее перспективным является радиометод их регистрации. Предложена концепция эксперимента ЛОРД, в котором радиоволновой детектор установлен на борту окололунного спутника. Описана структура и принцип работы этого прибора. На основе аналитического подхода и моделирования методом Монте–Карло продемонстрирован высокий научный потенциал эксперимента ЛОРД, возможности которого при регистрации частиц с предельными энергиями значительно выше, чем у всех существующих в настоящее время установок.

Ключевые слова: космические лучи, нейтрино, ультравысокие энергии, радиометод регистрации, орбитальный радиодетектор, апертура эксперимента, ограничения на потоки.

Обсуждаются основные возможные источники космических частиц ультравысоких энергий ($E_{CR} \geq 10^{20}$ эВ), которые могли бы существовать, исходя из современных теоретических моделей. В развитие идеи использования поверхностного слоя Луны в качестве черенковского радиатора когерентного радиоизлучения в области прозрачности предложена новая космическая технология регистрации каскадов от космических лучей и нейтрино ультравысоких энергий (КЛУВЭ и НУВЭ).

Показано, что применение радиометода целесообразно при ультравысоких энергиях, поскольку мощность когерентного радиоизлучения растет квадратично с энергией каскада.

Рассчитаны апертуры регистрации КЛУВЭ и НУВЭ, а также ограничения на потоки для различных теоретических моделей источников частиц ультравысоких энергий.

1. Проблемы регистрации космических лучей и нейтрино ультравысоких энергий. Изучение природы и спектров космических частиц с предельными существующими во Вселенной энергиями, является одной из наиболее актуальных задач современной науки. Информация о природе таких частиц важна для решения фундаментальных проблем астрофизики и физики элементарных частиц [1], касающихся источников и механизмов ускорения космических лучей, природы темной материи [2], и возможно, нарушения основополагающих принципов теории относительности.

Основная трудность при регистрации космических лучей ультравысоких энергий (КЛУВЭ) связана с редкостью этих событий. Если при энергии $E_{CR} \geq 10^{19}$ эВ интегральный поток КЛУВЭ равен $\sim 1 \text{ км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$, то при $E_{CR} \geq 10^{20}$ эВ этот поток может составлять всего одну частицу на 1 км^2 в столетие. Поэтому для регистрации КЛУВЭ необходимы детекторы с огромными площадями, в которых регистрируется не первичное космическое излучение, а вторичные частицы, входящие в состав широкого атмосферного ливня (ШАЛ). В настоящее время уже работают детекторы КЛУВЭ нового поколения с очень большой апертурой. Среди них недавно введенная в строй установка AUGER [3] и Telescope Array [4]. Площадь покрытия детекторами в двух массивах установки AUGER составляет $6 \times 10^3 \text{ км}^2$, а в установке Telescope Array – около 10^3 км^2 . Однако эти детекторы, по-видимому, близки к пределу по площади обзора, достижимой для наземных детекторов.

Следующий шаг на пути регистрации частиц с предельно высокими энергиями связан с выходом в космическое пространство. В проекте EUSO предполагается установить детектор на Международной космической станции [5], который из космоса будет регистрировать флуоресцентный и черенковский свет в атмосфере Земли. Эффективная апертура этого детектора составит около 10^5 км^2 стер.

Может оказаться, что апертуры установок AUGER, Telescope Array и даже EUSO будут недостаточно велики, чтобы надежно регистрировать КЛУВЭ с энергиями $E_{CR} \geq 10^{20}$ эВ (если такие существуют в Природе).

Одним из возможных кандидатов на первичную частицу, которая могла бы порождать события взаимодействия КЛУВЭ, является нейтрино ультравысоких энергий (НУВЭ) [1, 6]. До настоящего времени нейтрино астрофизического происхождения регистрировалось только от двух низкоэнергичных источников: Солнца и сверхновой SN 1987A. Однако имеются серьезные основания предполагать существование различных

астрофизических и космологических источников нейтрино с энергиями, различающимися более чем на 10 порядков – от нескольких единиц 10^{12} эВ до $10^{22}–10^{24}$ эВ. Наиболее энергичными астрофизическими источниками, в которых протоны или ядра могут быть ускорены до энергий $\sim 10^{20}$ эВ, являются гамма-всплески (ГВ) и активные ядра галактик (АЯГ). В таких “космических ускорителях” в результате pp - и $p\gamma$ -взаимодействий должны рождаться заряженные пионы, распады которых должны приводить к образованию потоков нейтрино с энергиями, достигающими $E_\nu \approx 10^{19}$ эВ. Нейтринные потоки могут возникать и при распадах или аннигиляции сверхмассивных частиц, которые образовались на ранней стадии эволюции Вселенной и дожили до наших дней. Максимальные энергии нейтрино в этих сценариях зависят от массы распадающихся тяжелых частиц и могут простираться до $E_\nu \approx 10^{24}$ эВ. “Гарантированным” источником нейтрино сверхвысоких энергий являются реакции взаимодействия распространяющихся во Вселенной КЛУВЭ с космическим микроволновым фоном. Распады пионов, образованных в реакциях фоторождения, приводят к потоку “космогенных” нейтрино, энергетический спектр которого имеет максимум при энергиях $E_\nu \approx 10^{19}$ эВ. Возможность измерения потока космогенных нейтрино обычно служит отправной точкой при оптимизации апертур проектируемых нейтринных детекторов. Нейтринные потоки, рассчитанные для различных моделей, представлены на рис. 1.

Для регистрации НУВЭ с энергиями $E_\nu \geq 10^{19}$ эВ необходимы нейтринные детекторы с объемом больше 1 км^3 . В таких детекторах используются природные объемы чистой воды или льда, которые служат одновременно мишенью для взаимодействий нейтрино и радиатором для генерации черенковского излучения вторичными частицами, образующимися в результате нейтринных взаимодействий. В настоящее время ведется сооружение нейтринных телескопов в Средиземном море (ANTARES, NESTOR, NEMO, KM3NeT) и в Антарктиде (IceCube) с просматриваемыми объемами воды и льда более 1 км^3 [6].

Если потоки космических нейтрино окажутся меньше, чем предсказывается в наиболее распространенных моделях, то объемов воды и льда $\sim 1 \text{ км}^3$, просматриваемых в нейтринных телескопах нового поколения, будет недостаточно для их обнаружения.

2. Радиометод регистрации космических лучей и нейтрино ультравысоких энергий. Для обнаружения космических лучей и нейтрино с энергиями $E \geq 10^{20}$ эВ требуется создание установок, работающих на новых принципах и методах регистрации. В первую очередь, надежды связаны с экспериментами, в которых регистрируется (или предполагается регистрировать) когерентное радиоизлучение от каскадов, инициированных

взаимодействиями нейтрино в таких радиопрозрачных природных средах, как атмосфера (LOFAR), ледяные щиты Гренландии (FORTE) и Антарктиды (RICE, ARIANNA, ANITA) и соляные месторождения (SALSA). В ряде проектов в качестве мишени для регистрации КЛУВЭ и НУВЭ предлагается использовать радиопрозрачный приповерхностный слой лунного грунта (реголит) и наблюдать радиоизлучение от каскадов с помощью наземных радиотелескопов (WSRT, SKA). В разрабатываемом нами эксперименте ЛОРД (Лунный Орбитальный Радиодетектор) радиоприемные устройства предложено разместить на окололунном спутнике ([7–9]). Потенциал этих экспериментов по регистрации космических лучей и нейтринных потоков показан на рис. 1.

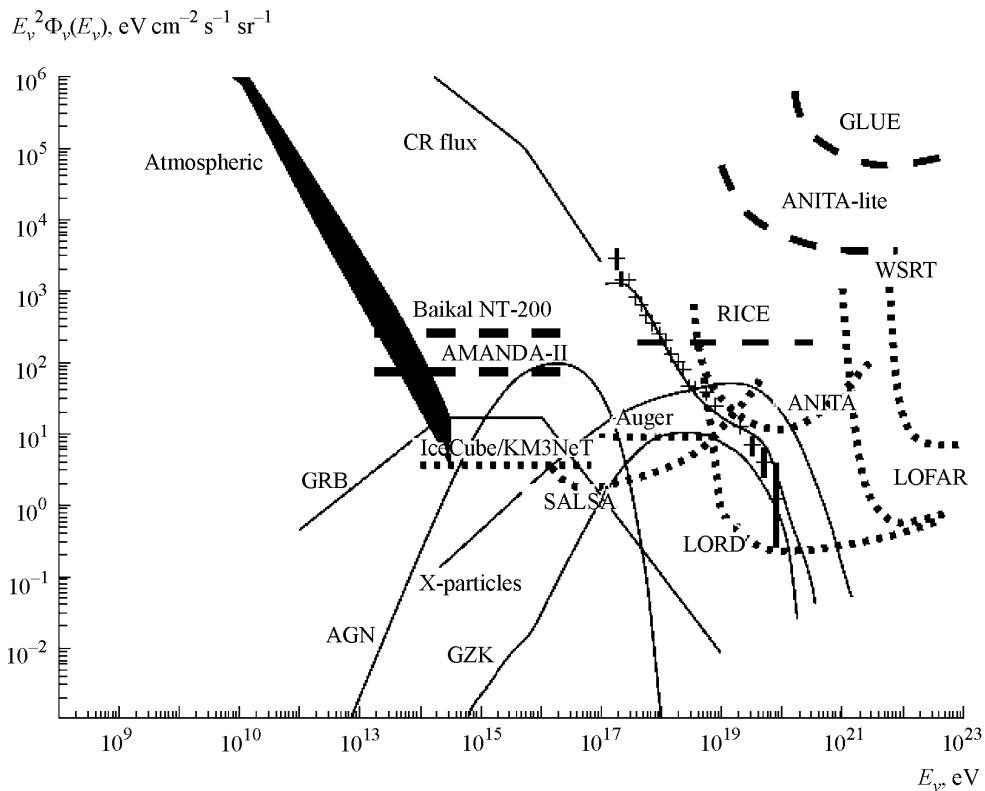


Рис. 1: Нейтринные потоки, рассчитанные для моделей ГВ, АЯГ, “top-down”-сценария, космогенные (ГЗК), атмосферные [6]. Также показаны ограничения на потоки, полученные в экспериментах “Байкал”, AMANDA, FORTE, RICE, GLUE и ожидаемые ограничения в запланированных на ближайшее будущее исследованиях – KM3NeT, IceCube, AUGER, LOFAR, ANITA, SALSA, WSRT, ЛОРД. Для сравнения с нейтринными потоками приведен измеренный поток космических лучей (КЛ).

Радиометод регистрации космических лучей и нейтрино был впервые предложен Г. А. Аскарьяном еще в начале 60-х годов [10, 11]. Важнейшим преимуществом радиометода является возможность использования очень большой длины распространения радиоволн, что позволяет обеспечить просмотр огромных объемов атмосферы или других прозрачных для радиоизлучения сред, и регистрировать с высокой статистической обеспеченностью редкие события при ультравысоких энергиях. Применение радиометода особенно целесообразно при ультравысоких энергиях, поскольку мощность когерентного радиосигнала растет квадратично с энергией ливня, и при высоких энергиях мощность излучения в радиодиапазоне превосходит мощность излучения в оптической области.

3. Радиодетектор ЛОРД – инструмент для регистрации частиц ультравысоких энергий. Идея использовать Луну как мишень для регистрации нейтрино (и космических лучей) радиометодом с помощью приемников, расположенных на лунной поверхности, впервые была высказана Г. А. Аскарьяном [11]. Затем она была заново проанализирована Р. Д. Дагкесаманским и И. М. Железных [12] в рамках проекта RAMHAND, где предлагалось использовать для регистрации радиоимпульсов радиотелескопы, размещенные на Земле.

В лунных экспериментах по регистрации частиц радиометодом средой, в которой происходит рождение каскадов и генерация радиоизлучения, является реголит, состоящий из мелких частиц и небольших камней, выброшенных при ударах метеоритов о поверхность Луны. Толщина реголита обычно составляет 10–30 м (местами до 100 м), эффективный объем – $V \sim 2 \cdot 10^5$ (км.в.э.)³, диэлектрическая постоянная – $\epsilon = 3$, средняя плотность – $\rho = 1.7$ г/см³. Длина поглощения радиоволн гигагерцового диапазона в реголите составляет $\Lambda(f) \approx 15$ м/ф(ГГц). Под слоем реголита находится более плотная порода, похожая на земной базальт, с диэлектрической постоянной $\epsilon = 6 - 9$.

Радиоизлучение генерируется каскадом от высокоэнергичной частицы в области углов вблизи черенковского конуса и в широком частотном диапазоне (частотные спектры радиосигналов простираются от десятков кГц до нескольких ГГц). При отсутствии плотной базальтовой подложки имеется когерентное поле излучения каскадов в реголите только от верхней части черенковского конуса. Часть этого излучения после преломления на границе “реголит–вакуум” выходит из лунного грунта и может быть зарегистрирована в окололунном пространстве (рис. 2). Радиоизлучение такого типа будем называть прямым радиоизлучением. В работах [13, 14], наряду с прямым радиоизлучением, мы указали на необходимость учета излучения, направленного в глубь Луны. В

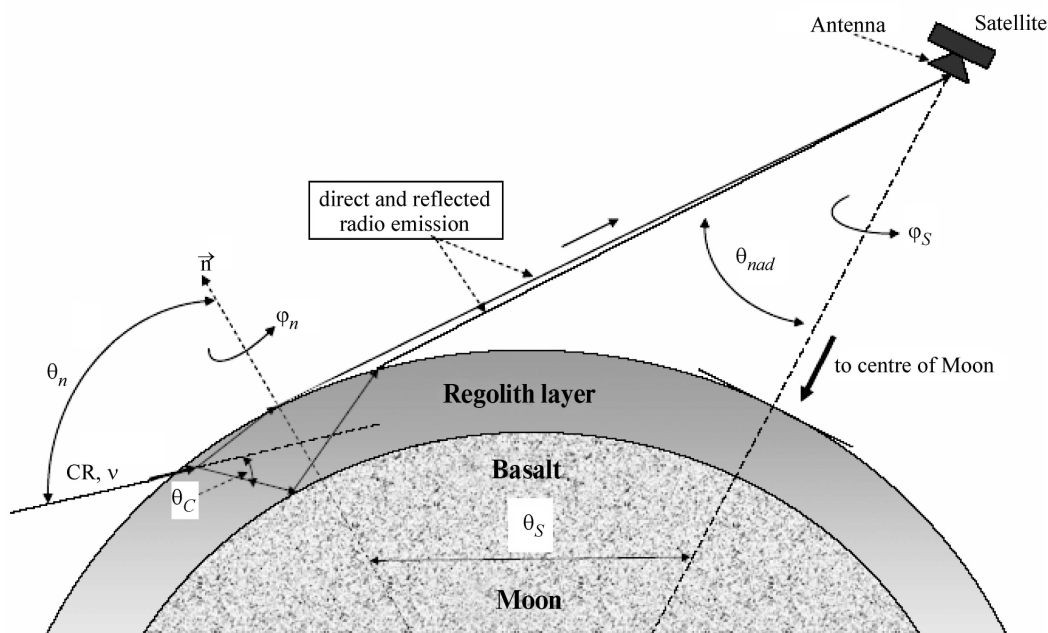


Рис. 2: Схема регистрации прямого и отраженного радиоизлучения в эксперименте ЛОРД.

этом случае, радиоизлучение после отражения на границе “реголит–подложка” и преломления на границе “реголит–вакуум” также будет выходить в окололунное пространство (рис. 2). Каскад от высокоэнергичной частицы, который зарождается на небольшой (0.5–1 м) глубине, порождает прямое радиоизлучение и с некоторой временной задержкой – отраженный от подложки запаздывающий радиосигнал.

Уровень шумов при регистрации с окололунного спутника существенно ниже, чем в экспериментах, использующих в качестве мишени ледяные щиты Антарктиды и Гренландии. Поскольку у Луны отсутствует атмосфера, то в лунном эксперименте можно регистрировать события, связанные с взаимодействием с лунным грунтом как КЛУВЭ, так и НУВЭ. При регистрации КЛУВЭ и НУВЭ радиосигналы от каскадов приходят в радиодетектор из области, просматриваемой антенной системой. Таким образом, радиодетектор позволяет регистрировать космические частицы, падающие на всю огромную площадь поверхности Луны. Поэтому, несмотря на чрезвычайно малые потоки частиц, ожидаемая скорость счета событий может быть значительной.

Исходя из этих соображений, была разработана концепция эксперимента ЛОРД, в котором система радиоантенн дециметрового диапазона будет помещена на искусствен-

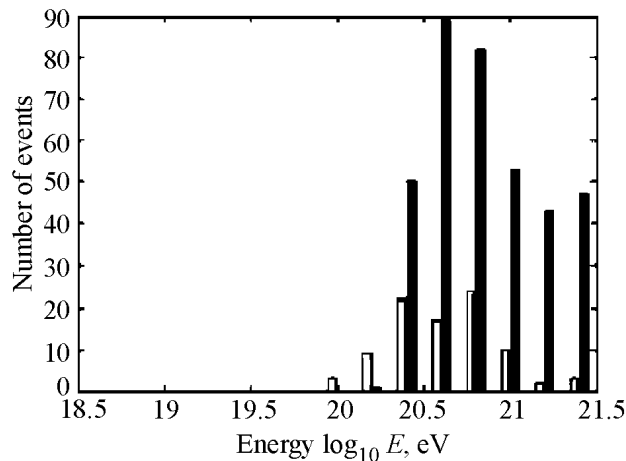


Рис. 3: Количество регистрируемых в эксперименте ЛОРД событий КЛУВЭ за один год. Белые столбики соответствуют событиям от прямых радиосигналов, черные столбики – событиям от отраженных радиосигналов.

ном спутнике Луны. Антенны просматривают лунную поверхность в пределах прямой видимости и регистрируют наносекундные радиоимпульсы, излучаемые адронными и электромагнитными каскадами.

Структура радиоволнового детектора включает в себя следующие устройства: антенную систему с малощумящими усилителями, радиочастотный тракт, систему формирования триггера, систему цифровой регистрации сигналов и бортовой компьютер.

4. *Потенциал эксперимента ЛОРД по регистрации космических лучей и нейтрино сверхвысоких энергий.* Возможности регистрации КЛУВЭ и НУВЭ в эксперименте ЛОРД на основе аналитического подхода рассмотрен нами в работах [7, 8]. В работе [9] была разработана математическая модель, в которой потенциал обнаружения и статистика взаимодействий КЛУВЭ и НУВЭ в эксперименте ЛОРД определены методом Монте–Карло. Вклады отраженных сигналов рассмотрены в работах [13, 14].

На рис. 1 показаны ограничения на потоки КЛУВЭ и НУВЭ, которые можно получить в течение трех лет наблюдений в эксперименте ЛОРД на окололунной орбите. Эти ограничения существенно превосходят возможности наиболее амбициозных экспериментов AUGER и ANITA, проводимых в настоящее время.

Такой высокий потенциал регистрации КЛУВЭ и НУВЭ обусловлен большими апертурами радиодетектора ЛОРД. Для космических лучей с энергиями $E_{CR} \geq 10^{20}$ эВ полная апертура ЛОРД составляет $2 \cdot 10^5$ км²ср, что почти на два порядка величины превышает апертуру эксперимента AUGER. Число регистрируемых событий в интер-

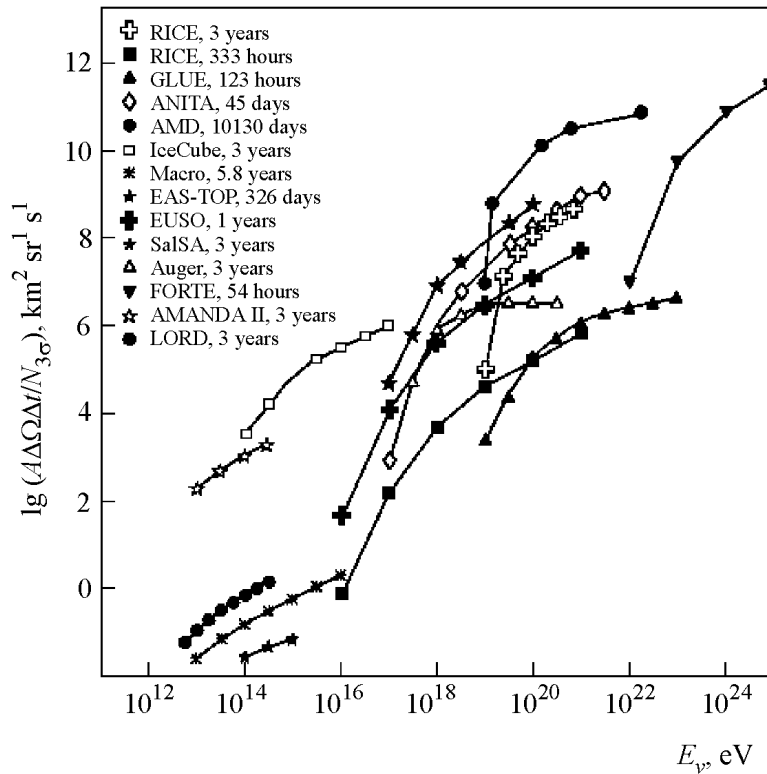


Рис. 4: Произведение апертуры детектора A , телесного угла $\Delta\Omega$ и времени экспозиции T для различных экспериментов по регистрации НУВЭ в зависимости от энергии.

валах энергии (за один год экспозиции) от КЛ ультравысоких энергий приведено на рис. 3. Из этого рисунка видно, что регистрация отраженных радиосигналов от КЛУВЭ с энергиями $E \geq 10^{20}$ эВ увеличивает суммарное число регистрируемых полезных событий в несколько раз.

Сравнительной величиной, характеризующей потенциал различных экспериментов по регистрации НУВЭ, является произведение апертуры детектора A , телесного угла $\Delta\Omega$ и времени экспозиции Δt . Эта величина показана на рис. 4, из которого следует, что возможности регистрации нейтрино с энергиями $E_{CR} \geq 10^{20}$ эВ в радиодетекторе ЛОРД почти на порядок превышают возможности прибора ANITA.

Заключение. Проработана концепция эксперимента по регистрации КЛУВЭ и НУВЭ с околорунной орбиты. Предложена архитектура радиодетектора ЛОРД.

Исходя из особенностей структуры приповерхностного слоя Луны, показана принципиальная возможность регистрации отраженных сигналов от границы реголит–базальт, что увеличивает статистику регистрируемых событий.

Высокий научный потенциал эксперимента ЛОРД послужил основанием для его включения в Федеральную космическую программу России в рамках миссии “Луна-Глоб”. В настоящее время ведется работа по разработке комплекса научной аппаратуры. Выведение спутника на окололунную орбиту запланировано на 2012 г.

Работа выполнена при поддержке грантом РФФИ N 08-02-00515 и программой РАН “Нейтринная физика”.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. А. Рябов, УФН **176**(9), 931 (2006).
- [2] В. А. Рябов, В. А. Царев, А. М. Цховребов, УФН **178**(11), 1129 (2008).
- [3] J. Abraham, P. Abreu, M. Aglietta, et al., Phys. Rev. Lett. **101**, 061101 (2008); (arXiv: astro-ph/0806.4302).
- [4] Y. Tameda, Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) **196**, 74 (2009).
- [5] Y. Takahashi, New J. Phys. **11**, 065009 (2009); (arXiv:0910.4187 [astro-ph]).
- [6] В. А. Рябов, ЭЧАЯ **40**(1), 5 (2009).
- [7] Г. А. Гусев, Б. Н. Ломоносов, К. М. Пичхадзе и др., Космические исследования **44**(1), 1 (2006).
- [8] Г. А. Гусев, Б. Н. Ломоносов, К. М. Пичхадзе и др., ДАН **406**(3), 327 (2006).
- [9] Г. А. Гусев, Б. Н. Ломоносов, Н. Г. Полухина и др., Математическое моделирование **20**(6), 67 (2008).
- [10] Г. А. Аскарьян, ЖЭТФ **41**, 616 (1961).
- [11] Г. А. Аскарьян, ЖЭТФ **48**, 988 (1965).
- [12] Р. Д. Дагкесаманский, И. М. Железных, Письма в ЖЭТФ **50**(5), 233 (1989).
- [13] G. A. Gusev, V. A. Chechin, B. N. Lomonosov, et al., NIM A, **604**, 124 (2009).
- [14] V. A. Ryabov, V. A. Chechin, G. A. Gusev, et al., Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) **196**, 458 (2009).

По материалам II Черенковских чтений: Новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике элементарных частиц (Москва, ФИАН, 14 апреля 2009 г.).

Поступила в редакцию 4 ноября 2009 г.