

УДК 539.1.074.4

ОТКЛИК ГИБРИДНОГО ВАКУУМНОГО ФОТОДЕТЕКТОРА КВАЗАР-370G НА ИМПУЛЬСЫ ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЗДУХЕ

© 2012 г. **А. Е. Чудаков**, **Б. К. Лубсандоржиев**, **В. А. Полещук**

*Институт ядерных исследований РАН
Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а
Поступила в редакцию 05.03.2012 г.*

Представлены результаты изучения отклика гибридного вакуумного фотодетектора КВАЗАР-370G на импульс черенковского излучения в воздухе. Показано, что временное разрешение фотодетектора при полной засветке фотокатода импульсом черенковского излучения однофотонной интенсивности и субнаносекундной длительности составляет ≤ 1 нс. При этом эффективность регистрации фотодетектором черенковского излучения равна $\sim 7\%$.

Изучение первичного космического излучения в области энергий 10^{14} – 10^{17} эВ несомненно является одной из важнейших задач современной физики космических лучей. Это связано как с неясностью природы “излома” спектра первичных космических лучей при энергии $\sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ [1], так и с вопросами происхождения самих космических лучей – их источников и механизмов ускорения до таких энергий. Кроме того, в области энергий ниже “излома” спектра (10^{14} – 10^{15} эВ) существует разрыв между данными, полученными в результате прямых измерений спектров в спутниковых и баллонных экспериментах, и данными, полученными в наземных экспериментах, регистрирующих широкие атмосферные ливни (ш.а.л.).

Широкоугольные черенковские детекторы ш.а.л. являются на сегодняшний день одними из самых эффективных инструментов для исследования космических лучей в области “излома” спектра. В настоящее время широко обсуждается ряд проектов по созданию установок с энергетическим порогом 20–50 ТэВ, например проект SCORE [2]. Установки с такими низкими энергетическими порогом позволяют вести исследования и в гамма-астрономии высоких энергий. Для эффективного понижения энергетического порога в этих детекторах необходимо применять быстрые высокочувствительные фотодетекторы с большой чувствительной площадью.

Фотодетектор КВАЗАР-370G [3–6], разработанный именно для использования в широкоугольных черенковских детекторах ш.а.л., хорошо, на наш взгляд, подходит для выполнения таких задач и мог бы служить хорошей базой для разработок новых фотодетекторов для экспериментов следующего поколения. Кратко напомним принцип действия фотодетектора КВАЗАР-370G (см. рис. 1). Этот фотодетектор является гибридным вакуумным фотодетектором, в котором

соединены электронно-оптический преобразователь света с полусферическим фотокатодом (ΦK) диаметром 37 см и люминесцентный экран, расположенный непосредственно над фотокатодом (ϕk) диаметром ~ 3 см фотоэлектронного умножителя (ф.э.у.) классического типа. Между фотокатодом преобразователя света и люминесцентным экраном приложено высокое напряжение 25 кВ. В этом фотодетекторе люминесцентный экран преобразователя света и фотокатод ф.э.у. являются системой, регистрирующей фотоэлектроны с фотокатода преобразователя света, и, по сути, играют роль первого каскада умножения фотоэлектронов. Лю-

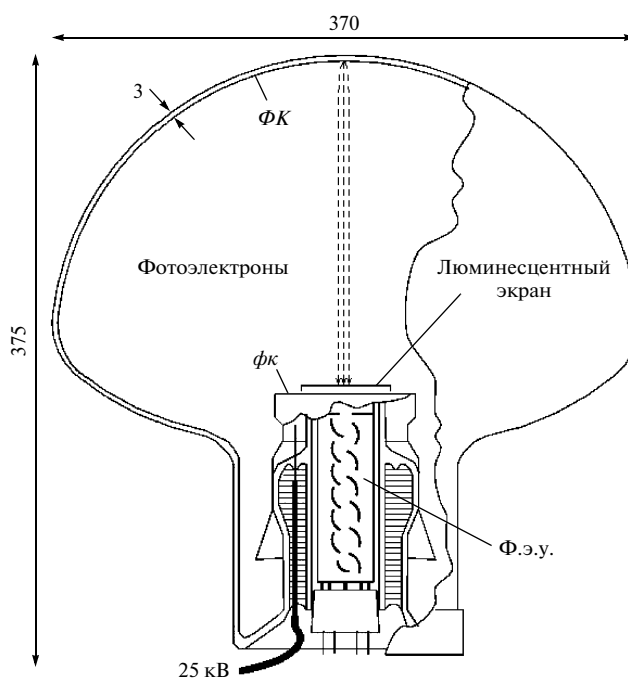


Рис. 1. Фотодетектор КВАЗАР-370G.

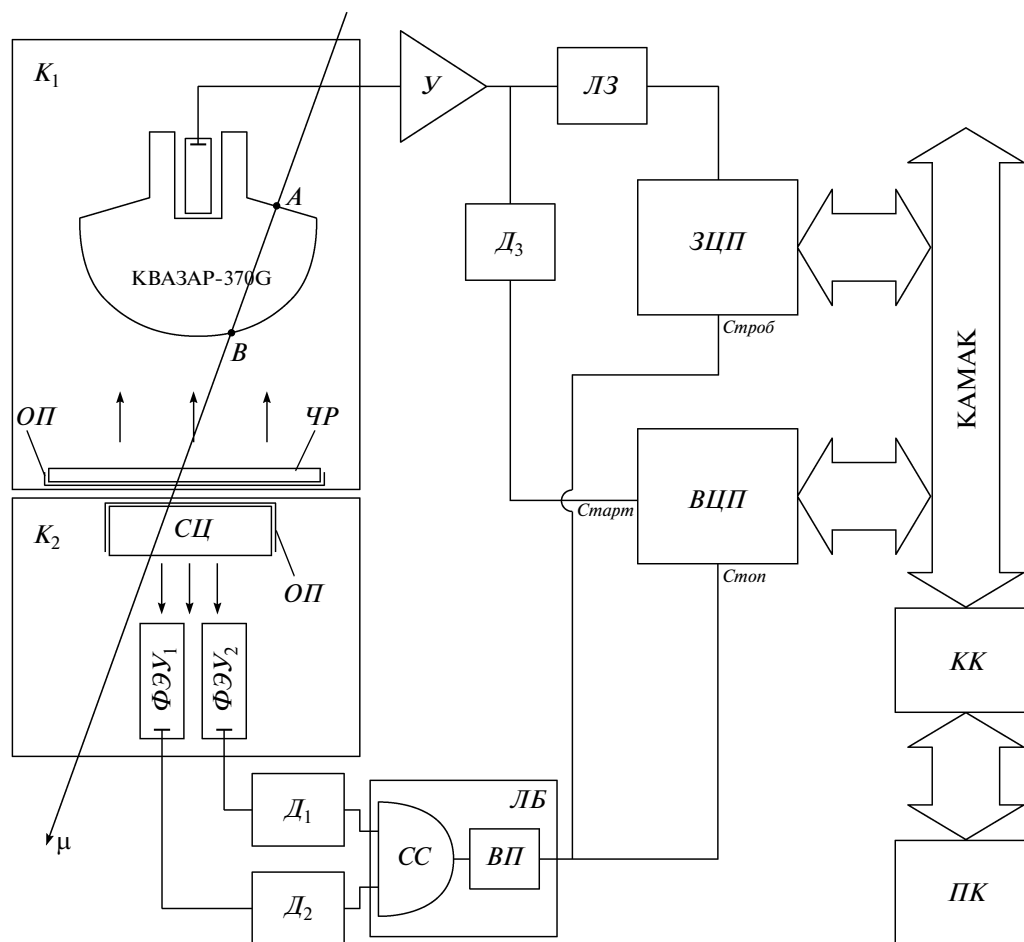


Рис. 2. Функциональная схема измерительного стенда. K_1, K_2 – светонепроницаемые контейнеры; ЧР – радиатор черенковского излучения; ОП – светоотражающее покрытие; СЦ – пластиковый сцинтиллятор; ФЭУ₁, ФЭУ₂ – быстродействующие фотоумножители Photonis XP2020; μ – возможная траектория мюона; У – усилитель импульсов; Д₁–Д₃ – дискриминаторы импульсов LeCroy 621AL; ЛБ – логический блок; СС – схема совпадений; ВП – блок выбора первого из сработавших фотоумножителей; ЛЗ – линия задержки; ЗЦП – зарядоцифровой преобразователь; ВЦП – времяцифровой преобразователь; КК – крейт-контроллер КАМАК LeCroy 8901A; ПК – персональный компьютер Apple Macintosh.

минесцентный экран представляет собой тонкий слой неорганического сцинтиллятора $Y_2SiO_5:Ce + BaF_2$ [7, 8], покрытого алюминиевой пленкой для предотвращения обратной оптической связи и увеличения световых выходов экрана. В результате, фотоэлектрон с фотокатода предусилителя света, ускоренный до энергии 25 кэВ, производит в среднем 20–25 фотоэлектронов в ф.э.у. Такая конструкция фотодетектора позволяет достичь высоких значений амплитудного и временного разрешений.

Фотодетектор КВАЗАР-370G успешно применяется в ряде космофизических экспериментов – в детекторе ТУНКА [9–12], специализированном наледном черенковском детекторе ш.а.л. на озере Байкал [13, 14] и черенковском детекторе QUEST [15] в национальной лаборатории Гран Сассо в Италии.

Фронт черенковского излучения ш.а.л. с хорошей точностью аппроксимируется плоскостью [16, 17], т.е. можно считать, что индивидуальные фотодетекторы в оптических модулях черенковских детекторов ш.а.л. засвечиваются практически плоской световой волной. Временные и амплитудные отклики фотодетекторов используются для восстановления параметров зарегистрированных ливней. Поэтому необходимо знать характеристики временного и амплитудного откликов фотодетектора КВАЗАР-370G на субнаносекундные импульсы черенковского излучения в воздухе. Исследования отклика фотодетектора проводились с помощью измерительного стенда, функциональная схема которого представлена на рис. 2.

Исследуемый фотодетектор КВАЗАР-370G размещается в отдельном светонепроницаемом контейнере K_1 и фиксируется в вертикальном положении с фотокатодом, ориентированным вниз.

На дне контейнера закреплена пластина радиатора черенковского излучения из органического стекла *ЧР* размерами 50×50 см и толщиной 0.7 см. Все стороны пластины отполированы. На сторону, соприкасающуюся с дном контейнера, и боковые стороны пластины нанесено светоотражающее покрытие *ОП* с высоким коэффициентом отражения. Расстояние между пластиной и фотодетектором составляет ~ 50 см. Для подавления отражения света внутренние поверхности контейнера оклеены черной бархатной тканью. Вся описанная геометрия была подобрана таким образом, чтобы уровень засветки фотокатода фотодетектора КВАЗАР-370 черенковским светом от радиатора был преимущественно однофотозлектронным для определения временного разрешения фотодетектора. В этом же контейнере размещается источник высоковольтного напряжения питания 25 кВ для преусилителя света фотодетектора.

В другом светонепроницаемом контейнере K_2 , расположенном непосредственно под контейнером K_1 с исследуемым фотодетектором, устанавливаются два быстродействующих фотоумножителя $\PhiЭУ_1$ и $\PhiЭУ_2$ (Photonis XR2020) и пластиковый сцинтиллятор *СЦ* на основе полистирола размером $20 \times 20 \times 3$ см, как показано на рис. 2. Сцинтиллятор *СЦ* располагается непосредственно под радиатором черенковского излучения. Все стороны сцинтиллятора, кроме стороны, обращенной к фотоумножителям $\PhiЭУ_1$ и $\PhiЭУ_2$, также покрыты светоотражающим покрытием *ОП*. Расстояние между сцинтиллятором и фотоумножителями ~ 30 см. Еще раз подчеркнем, что контейнер с фотодетектором КВАЗАР-370G и радиатором черенковского излучения и контейнер с пластиковым сцинтиллятором и фотоумножителями $\PhiЭУ_1$ и $\PhiЭУ_2$ оптически полностью изолированы. Анодные сигналы $\PhiЭУ_1$ и $\PhiЭУ_2$ поступают на входы дискриминаторов D_1 и D_2 (LeCroy 621AL), выходные сигналы которых подаются на входы логического блока *ЛБ*, включающего в себя схему совпадений *СС* и электронную систему выбора первого сработавшего фотоумножителя *ВП*. Пороги срабатывания дискриминаторов D_1 и D_2 равны $0.22A$, где A – средняя амплитуда отклика фотоумножителей $\PhiЭУ_1$ и $\PhiЭУ_2$ на прохождение мюона через сцинтиллятор *СЦ*. Такой уровень дискриминации сигналов позволяет существенно подавить влияние радиоактивности при высокой эффективности регистрации мюонов ($\sim 95\%$). Мюоны, пересекающие радиатор и пластиковый сцинтиллятор, вызывают срабатывание фотоумножителей в нижнем контейнере и приводят к появлению триггерного сигнала. Выходной сигнал схемы совпадений используется в качестве стробирующего сигнала *Строб* для зарядоцифрового преобразователя *ЗЦП* и сигнала *Старт* для времяцифрового преобразователя *ВЦП*. На вход *ЗЦП* подается

прошедший через кабельную линию задержки *ЛЗ* анодный сигнал фотодетектора КВАЗАР-370G. Сигнал *Смон ВЦП* формируется дискриминатором D_3 (LeCroy 621AL) от анодного сигнала фотодетектора КВАЗАР-370G, усиленного быстродействующим импульсным усилителем *У* (LeCroy 612AM). В качестве зарядоцифрового преобразователя используется блок LeCroy 2249A. Времяцифровой преобразователь *ВЦП* выполнен на основе интегральной микросхемы преобразователя заряд–время КР1101ПД1 [18]. Шаг *ВЦП* составляет 100 пс, а максимальный диапазон корректно измеряемых временных интервалов – 21 нс. Все электронные блоки выполнены в стандарте КАМАК и работают под управлением персонального компьютера *ПК* Apple Macintosh с помощью кейт-контроллера LeCroy 8901A.

Уровень дискриминации выходных сигналов фотодетектора КВАЗАР-370G соответствует $\sim 0.25q_1$, где q_1 – средний заряд однофотозлектронных импульсов ф.э.у., входящего в состав фотодетектора КВАЗАР-370G. В измерениях для простоты использовался обычный интегральный дискриминатор с фиксированным порогом. Скорость счета импульсов темнового тока фотодетектора при данном уровне дискриминации сигналов довольно высока и составляет $\sim 5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ и обусловлена, в основном, световым фоном от послесвечения сцинтиллятора в люминесцентном экране фотодетектора. Следует отметить, что с большей точностью отметка времени срабатывания фотодетектора КВАЗАР-370G вырабатывается более сложной двухплечевой дискриминаторной системой со стробированием [19, 20], которая к тому же позволяет существенно подавить и скорость счета темнового тока фотодетектора.

Разброс времени появления сигнала *Старт* относительно момента прохождения мюона измерялся в отдельном эксперименте с использованием дополнительного быстродействующего фотоумножителя Photonis XR3112B, соединенного непосредственно с пластиковым сцинтиллятором оптической смазкой ВС-630. Применение логического блока с выбором первого из сработавших ф.э.у. позволяет уменьшить величину разброса до ~ 300 пс, что не вносит какого-либо заметного вклада в измерения временного отклика исследуемого фотодетектора на импульс черенковского излучения.

На рис. 3 представлено зарядовое распределение отклика фотодетектора КВАЗАР-370G на импульс черенковского излучения, произведенный в радиаторе мюонами космических лучей. Поскольку процессы рождения фотозлектронных подчиняются пуассоновскому закону, то среднее значение n этого распределения определяется по формуле

$$P(0) = \exp(-n),$$

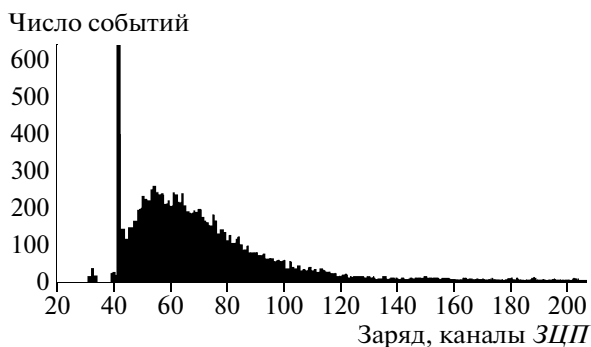


Рис. 3. Зарядовое распределение событий, зарегистрированных фотодетектором КВАЗАР-370G при прохождении мюонов через радиатор.

где $P(0)$ — доля пьедестальных (“нулевых”) событий в полном спектре. Получено значение $n = 1.6$ фотоэлектронов. Пьедестальные события находятся в области 42-го канала (рис. 3). Небольшое количество событий вокруг 33-го канала распределения обусловлено пьедестальными событиями, совпавшими с выбросами противоположной полярности от импульсов противоположного тока фотодетектора КВАЗАР-370G.

Оценим среднее число фотонов черенковского излучения, падающих на фотокатод фотодетектора КВАЗАР-370G. При прохождении релятивистского мюона через радиатор из органического стекла толщиной 7 мм рождается ~ 250 фотонов в диапазоне длин волн 300–650 нм [21]. Полагаем, что угловое распределение фотонов, вылетающих из радиатора, близко к косинусоидальному (ламбертовскому), т.е. $I_\gamma(\varphi) \sim I_\gamma(0)\cos\varphi$, где $I_\gamma(0)$ — плотность потока фотонов, вылетающих по нормали к поверхности радиатора; φ — угол вылета фотонов из радиатора. Зенитное угловое распределение мюонов хорошо описывается зависимостью $I_\mu(\theta) \sim I_\mu(0)\cos^2\theta$, где $I_\mu(0)$ — вертикальная составляющая потока мюонов; θ — зенитный угол. Далее, учитывая телесный угол, образованный исследуемым фотодетектором, радиатором черенковского излучения и пластиковым сцинтиллятором, можно довольно просто оценить число N_γ черенковских фотонов, достигающих фотокатода фотодетектора КВАЗАР-370G: $N_\gamma \approx 22$ фотонов. Таким образом, средняя эффективность фотодетектора КВАЗАР-370G к черенковскому излучению составляет $\eta = n/N_\gamma \sim 7\%$ в диапазоне длин волн 300–650 нм.

В распределении времени срабатывания фотодетектора КВАЗАР-370G относительно триггерного сигнала от пластиковых сцинтилляторов отчетливо видны два пика (рис. 4). Первый пик вокруг ~ 70 -го канала обусловлен черенковскими фотонами, произведенными мюоном в стекле фотодетектора КВАЗАР-370G, точки *A* и *B* на возможной

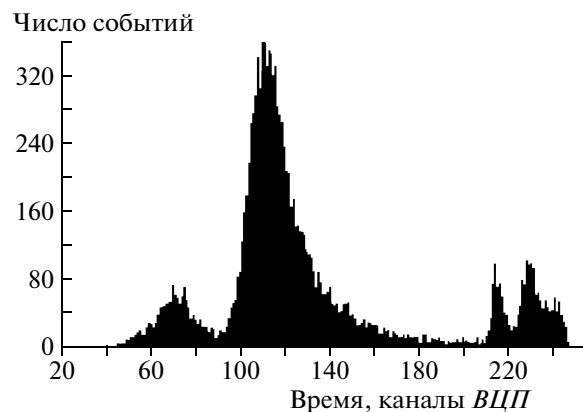


Рис. 4. Распределение времени срабатывания фотодетектора КВАЗАР-370G от импульсов черенковского излучения, возникающих при прохождении мюонов через радиатор.

траектории мюона μ (рис. 2). Так как расстояние между радиатором черенковского излучения и фотодетектором КВАЗАР-370G составляет ~ 50 см, то черенковская вспышка в стекле фотодетектора должна опережать фотоны черенковского импульса, произведенного в радиаторе, приблизительно на ~ 4 – 4.5 нс, что хорошо видно в распределении времен срабатывания фотодетектора КВАЗАР-370G на рис. 4. Учитывая толщину стекла (2–3 мм), уровень сигнала от таких событий должен составлять 5–10 фотоэлектронов. Это хорошо подтверждается 2D-диаграммой измеренных событий “Время–Заряд”, представленной на рис. 5. Часть распределения с временами больше 210-го канала ВЦП соответствует так называемым “нон-стоповым” событиям, т.е. событиям, в которых отсутствуют сигналы S_{top} , или, другими словами, “нулевым” событиям для фотодетектора КВАЗАР-370G. Основной пик распределения в области 110-го канала соответствует отклику исследуемого фотодетектора на импульс черенковского излучения в радиаторе. Ширина этого пика составляет ~ 2.2 нс (п.ш.п.в. — полуширина на полувысоте).

Высокие временные и амплитудные характеристики фотодетектора КВАЗАР-370G делают его хорошим инструментом для экспериментов в черенковских детекторах ш.а.л. Следует отметить, что интенсивность черенковского излучения преобладает в коротковолновой области спектра, где, к сожалению, чувствительность фотодетектора ограничена в основном из-за материала стеклооболочки. Применение спектросмещающих полимерных пленок, позволяющих увеличить чувствительность фотодетектора КВАЗАР-370G к черенковскому свету в воздухе в ~ 2 раза [22], и использование в этом фотодетекторе новых высокоэффективных фотокатодов с квантовой эффективностью выше 35–40% [23] в диапазоне длин

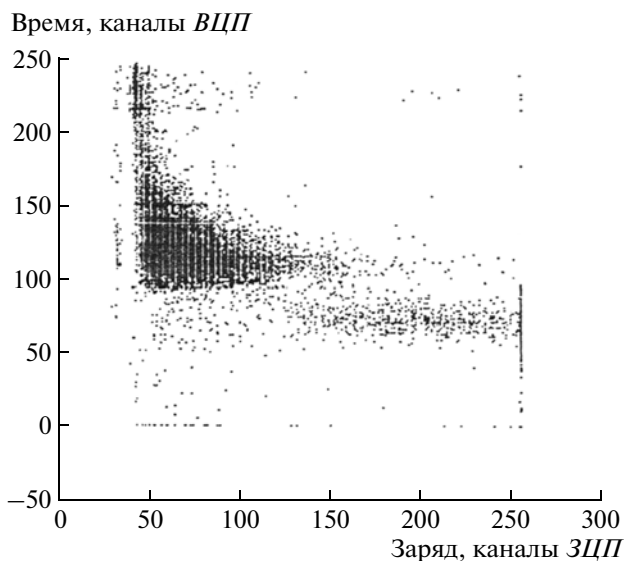


Рис. 5. 2D-диаграмма событий, зарегистрированных фотодетектором КВАЗАР-370G.

волн 350–400 нм открывают новые возможности для экспериментов по изучению первичного космического излучения в черенковских детекторах ш.а.л.

Безвременная кончина нашего учителя Александра Евгеньевича Чудакова, по инициативе и при активном участии которого были проведены все описанные выше измерения, задержала публикацию данной работы. Прошедшие годы показали, что результаты работы продолжают быть исключительно актуальными.

Авторы искренне признательны профессорам **F. Reines** и H. Sobel за теплое гостеприимство и помощь в проведении измерений в Калифорнийском университете г. Ирвайн, а также В.Ч. Лубсандоржиевой за внимательное прочтение рукописи статьи и многочисленные ценные обсуждения и замечания.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 16.518.11.7051 от 12 мая 2011 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликов Г.В., Христиансен Г.Б. // ЖЭТФ. 1958. Т. 35. С. 635.
2. Pluczykont M., Kneiske T., Hampf D., Horns D. // arXiv:0909.0445v1. [astro-ph.HE] 2 Sept 2009.
3. Bagduev R.I., Bezrukov L.B., Borisovets B.A. et al. // Proc. 2nd Intern. Conf. Trends in Astroparticle Physics. 10–12 October 1991, Aachen, Germany. 1991. P. 132.
4. Багдугев Р.И., Безруков Л.Б., Борисовец Б.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 1993. Т. 57. № 4. С. 135.
5. Bagduev R.I., Bezrukov L.B., Budnev N.M. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 1999. V. A420. P. 138.
6. Belolapnikov I.A., Bezrukov L.B., Borisovets B.A. et al. // Astroparticle Physics. 1997. V. 7. P. 263.
7. Лубсандоржиев Б.К. // Nucl. Instrum. and Methods A. 2000. V. A442. P. 368.
8. Лубсандоржиев Б.К., Похил П.Г., Путилов О.А., Степаненко З.И. // ПТЭ. 2001. № 3. С. 155.
9. Буднев Н.М., Чернов Д.В., Гресс О.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2002. Т. 66. № 11. С. 1563.
10. Буднев Н.М., Васильев Р.В., Вишневецки Р. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2005. Т. 69. № 3. С. 343.
11. Буднев Н.М., Вишневецки Р., Гресс О.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71. № 4. С. 493.
12. Lubsandorzhiyev B.K. // Nucl. Instrum. and Methods A. 2008. V. 595. P. 73.
13. Васильев Р.В., Гресс О.А., Корестелева Е.Е. и др. // ПТЭ. 2001. № 5. С. 51.
14. Васильев Р.В., Гресс О.А., Корестелева Е.Е. и др. // ПТЭ. 2002. № 5. С. 51.
15. Koresteleva E., Kuzmichev L., Prosin V., Lubsandorzhiyev B. // Intern. J. Mod. Phys. 2005. V. A20. P. 6837.
16. Фомин Ю.А., Христиансен Г.Б. // Ядерная физика. 1971. Т. 14. Вып. 3. С. 6426.
17. Васильев Р.В., Гресс О.А., Коростелева Е.Е. и др. // ПТЭ. 2009. № 2. С. 17.
18. Бельский В.И., Бушин Ю.Б., Зимин С.А. и др. // Электронная пром-сть. 1985. Вып. 9. С. 147.
19. Безруков Л.Б., Борисовец Б.А., Голиков А.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 1994. Т. 58. № 12. С. 149.
20. Лубсандоржиев Б.К., Кузьмичев Л.А., Васильев Р.В. // ПТЭ. 2003. № 2. С. 42.
21. Зрелов В.П. Излучение Вавилова-Черенкова и его применение в физике высоких энергий. М.: Атомиздат, 1968.
22. Лубсандоржиев Б.К., Шпиринг К.К., Кузьмичев Л.А. // ПТЭ. 2002. № 6. С. 13.
23. Dornic D., Genolini B., Moussant C. et al. // Nucl. Instrum. and Methods A. 2006. V. 567. P. 27.