

ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ С ГИБРИДНЫМ ВАКУУМНЫМ ФОТОДЕТЕКТОРОМ КВАЗАР-370G В ЧЕРЕНКОВСКИХ ДЕТЕКТОРАХ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ

© 2011 г. Р. В. Васильев*, Б. К. Лубсандоржиев*, **, Л. А. Кузьмичев***

* *Институт ядерных исследований РАН*

Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

** *Kepler Centre for Astro and Particle Physics, University of Tübingen*

Auf der Morgenstelle 14, D-72076 Tübingen Germany

*** *НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобелыцына Московского государственного*

университета им. М.В. Ломоносова

Россия, 119992, Москва, Ленинские горы, 1/2

Поступила в редакцию 18.02.2011 г.

Оценивается точность измерения времени в черенковских детекторах широких атмосферных ливней, основанных на гибридных вакуумных фотодетекторах КВАЗАР-370G с полусферическим фотокатодом большой площади. Определена зависимость погрешности измерения времени от амплитуды выходных импульсов фотодетектора и уровня светового фона ночного неба.

Регистрация черенковского излучения широких атмосферных ливней (ш.а.л.) относится к самым информативным методам исследования первичного космического излучения. За последние 15–20 лет в физике космических лучей получили развитие широкоугольные черенковские детекторы ш.а.л., использующие фотодетекторы с большой чувствительной площадью. В качестве примера можно привести детекторы ТУНКА [1–3] у нас в стране в Тункинской долине в Бурятии и AIRUBISS [4] на острове Ла Пальма в Испании. Большая чувствительная площадь фотодетекторов позволяет значительно понизить энергетический порог детекторов до уровня $\sim 10^{14}$ – 10^{15} эВ. Это делает подобные детекторы прекрасным инструментом для исследования первичного космического излучения в области так называемого “излома” энергетического спектра при энергии $\sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ. В настоящее время созданы или находятся в стадии проектирования и создания различные черенковские детекторы ш.а.л. на базе фотодетекторов большой чувствительной площади, например детекторы для совместной работы с глубоководным и подледным нейтринными телескопами [5, 6], а также установки с площадью 1 км^2 (ТУНКА-133 [7, 8]) и энергетическим порогом $\sim 10^{13}$ эВ (проект SCORE [9]).

В детекторе ТУНКА и в наледном черенковском детекторе ш.а.л. [5] в качестве регистрирующего элемента используются крупногабаритные фотодетекторы КВАЗАР-370G [10, 11]. Этот фотодетектор является модификацией фотодетектора КВАЗАР-370 [12–14], разработанного для глу-

боководных нейтринных экспериментов на озере Байкал [15]. Фотодетектор КВАЗАР-370, схематично показанный на рис. 1, является гибридным вакуумным фотодетектором и состоит из электронно-оптического предусилителя света с полусферическим фотокатодом $\varnothing 37$ см и фотоэлектронного умножителя (ф.э.у.) традиционного типа с фотокатодом $\varnothing 3$ см. Образовавшиеся на фотокатоде предусилителя света фотоэлектроны, ускоренные разностью потенциалов ~ 25 кВ, ударяют в люминесцентный экран, образуя при этом световые вспышки, которые регистрируются ф.э.у. Люминесцентный экран представляет собой слой быстрого и эффективного сцинтиллятора толщиной ~ 6 мкм, покрытого тонкой алюминиевой пленкой толщиной 100–300 нм для подавления оптической обратной связи и увеличения световых выходов экрана. Сцинтиллятор может быть использован в виде как порошкового люминофора, так и монокристалла. Такой подход позволяет достичь хороших временного ($\Delta t_{\text{fwhm}} \sim 1.8$ нс) и однофотоэлектронного амплитудного ($R_{1\text{фэ}} \sim 70\%$) разрешений [12–14]. Полуширина Δt_{fwhm} — это полная ширина на половине высоты (п.ш.в.п.) распределения времен пролета фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода, а $R_{1\text{фэ}}$ — полуширина зарядового распределения однофотоэлектронных импульсов.

В отличие от базового фотодетектора, в КВАЗАР-370G вместо люминесцентного экрана KC425-1 ($\text{Y}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$) используется экран с люминофором $\text{Y}_2\text{SiO}_5:\text{Ce} + \text{BaF}_2$ [16]. Этот люминофор синтезирован специально для данной модифика-

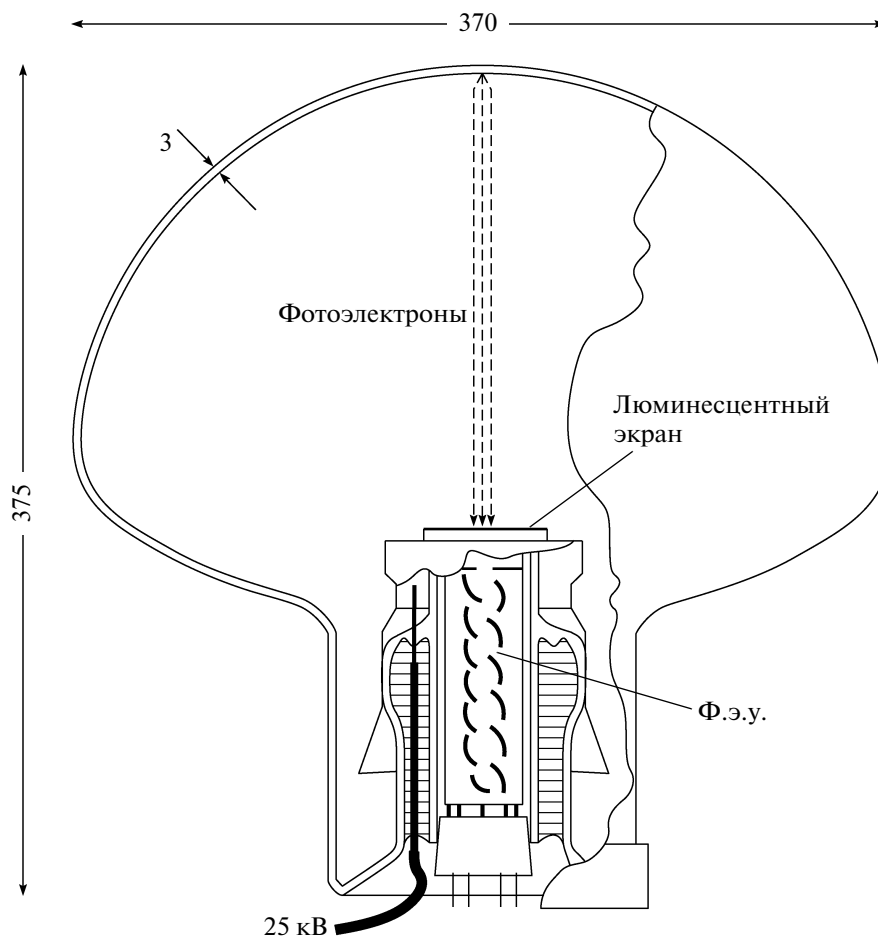


Рис. 1. Фотодетектор КВАЗАР-370G.

ции фотодетектора КВАЗАР-370G. Небольшое (2–3% по весу) добавление BaF_2 в люминофор $Y_2SiO_5:Ce$ существенно улучшает радиационную и химическую стойкость люминесцентного экрана, а световыход и кинетика свечения экрана остаются практически на прежнем уровне.

В черенковских детекторах ш.а.л. фотодетекторы работают в условиях светового фона ночного неба, что приводит к среднему постоянному анодному току индивидуальных фотодетекторов ~30–40 мкА со значительными флуктуациями тока. Фотодетектор КВАЗАР-370G оптимизирован для стабильной работы в таких условиях. Это достигается использованием не только более устойчивого к электронному облучению люминесцентного экрана, но и специализированного ф.э.у. с малым числом каскадов усиления в диодной системе и повышенным значением максимально допустимого постоянного анодного тока [17].

Исследования первичного космического излучения, проводимые в эксперименте ТУНКА в достаточно широком интервале энергий (10^{14} – 10^{16} эВ), требуют большого линейного диапазона измере-

мых амплитуд выходных сигналов индивидуальных оптических модулей детектора – от нескольких десятков фотоэлектронов (ф.э.) вплоть до $5 \cdot 10^4$ ф.э. Измерение времени регистрации ливня с помощью индивидуальных фотодетекторов используется для восстановления направления прихода ш.а.л. Погрешность измерений времени срабатывания фотодетекторов определяет один из ключевых параметров всего детектора в целом – его угловое разрешение. Временная отметка прихода ливня вырабатывается в электронной системе установки формирователем со следящим порогом, выполненным по традиционной схеме [18, 19].

Измерения погрешности временной привязки с использованием формирователя со следящим порогом (ФСП) из электронной системы детектора ТУНКА при регистрации световых импульсов наносекундной длительности фотодетектором КВАЗАР-370G в условиях светового фона ночного неба проводились на стенде, функциональная схема которого представлена на рис. 2.

На фотокатод фотодетектора КВАЗАР-370G с помощью пластикового оптоволоконного кабеля

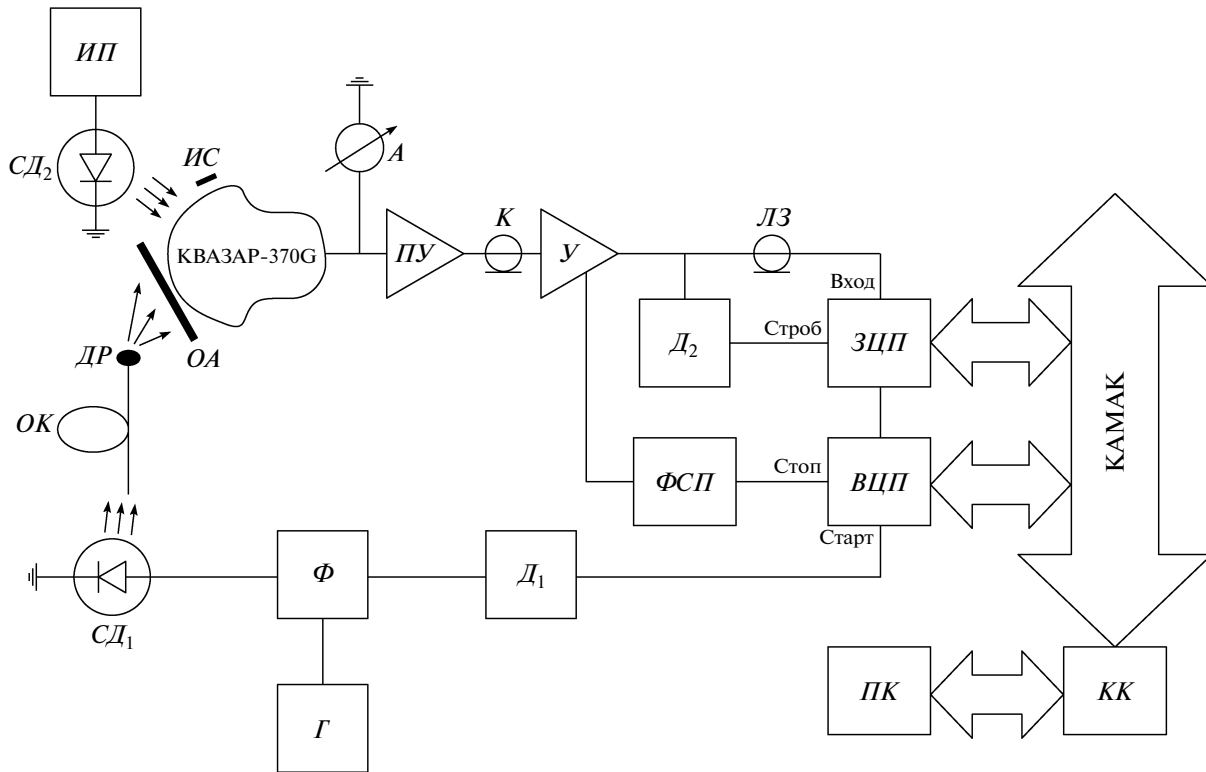


Рис. 2. Функциональная схема стенда для измерения погрешности временной привязки. CD_1, CD_2 – светоизлучающие диоды; Φ – формирователь импульса запуска светодиода; OK – пластиковый оптоволоконный кабель Siemens Cupoflex; DP – диффузный рассеиватель; $ИС$ – источник света на основе радиоактивного источника ^{241}Am и неорганического сцинтиллятора YAP ; Γ – генератор импульсов Г5-72; A – мультиметр В7-40/4; $ИП$ – источник питания ТЕС-23; OA – набор оптических аттенюаторов; $ПУ$ – предусилитель импульсов; K – коаксиальный кабель РК50-2-11 длиной 120 м; $У$ – усилитель импульсов; $\PhiСП$ – формирователь со следящим порогом; D_1 и D_2 – интегральные дискриминаторы импульсов LeCroy 623; $ВЦП$ – времяцифровой преобразователь БПТ-12А2; $ЛЗ$ – кабельная линия задержки; $ЗЦП$ – зарядово-цифровой преобразователь LeCroy 2249А; $КК$ – крейт контроллер КК009; $ПК$ – персональный компьютер IBM PC/AT-i486.

OK (Siemens Cupoflex) $\varnothing 1$ мм и диффузного рассеивателя света DP подаются световые импульсы от светоизлучающего диода CD_1 – светодиода NSPB310S фирмы Nichia Chemical Ltd. Формирователь импульсов запуска светодиода Φ собран на лавинных транзисторах ZTX415 и запускается от генератора импульсов Γ (Г5-72). Подробно формирователь описан в [20–22]. Длительность световых импульсов равна ~ 1.8 нс (п.ш.п.в.), а число фотонов в импульсе $\sim 10^9$. Световой фон ночного неба моделируется светодиодом CD_2 того же типа, что и CD_1 , но работающим в режиме постоянного тока от источника питания $ИП$ (ТЕС-23), и контролируется по постоянному анодному току фотодетектора. Для измерения зависимости времени срабатывания формирователя со следящим порогом $\PhiСП$ от амплитуды сигнала световой импульс ослабляется с использованием набора оптических аттенюаторов OA . Анодный сигнал фотодетектора, как и в самом детекторе ТУНКА, через предусилитель импульсов $ПУ$ по коаксиальному кабелю K (РК50-2-11) длиной 120 м подается на

вход усилителя импульсов $У$, выходные импульсы которого поступают на вход $\PhiСП$. Время нарастания сигнала после кабеля и усилителя импульсов на входе $\PhiСП$ составляет ~ 10 нс. Данный $\PhiСП$ оптимизирован на эти параметры входного сигнала. Выходной сигнал $\PhiСП$ подается на вход “Стоп” времяцифрового преобразователя $ВЦП$ (БПТ-12А2) [23] с диапазоном 5 мкс и шириной канала 75 пс. Выходной импульс формирователя импульсов запуска светодиода Φ , синхронизированный с импульсом запуска светодиода и стандартизованный интегральным дискриминатором D_1 (LeCroy 623), подается на вход “Старт” $ВЦП$. Погрешность временной привязки выходного импульса формирователя Φ к импульсу запуска светодиода не превышает 50 пс [24]. Постоянный средний анодный ток \bar{I}_a измеряется мультиметром A (В7-40/4). Уровень светового фона регулируется изменением тока через светодиод CD_2 в диапазоне $\bar{I}_a = 0–100$ мкА. Следует отметить, что в эксперименте ТУНКА средний анодный ток,

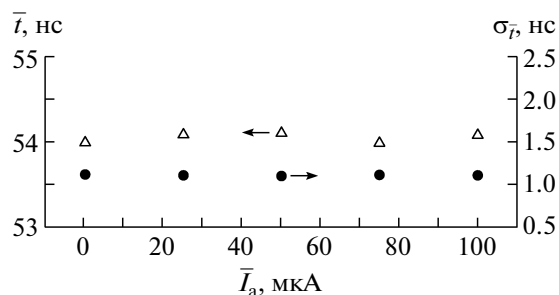


Рис. 3. Зависимости средней временной отметки \bar{t} и ее среднеквадратичного отклонения $\sigma_{\bar{t}}$ от постоянного среднего анодного тока \bar{I}_a фотодетектора КВАЗАР-370G, обусловленного световым фоном.

обусловленный световым фоном ночного неба, составляет $\bar{I}_a \sim 30$ мкА. Для контроля усиления и чувствительности фотодетектора КВАЗАР-370G в течение всего времени измерений использовались источник калибровочных световых импульсов ИС на базе радиоактивного источника ^{241}Am и тонкого слоя неорганического сцинтиллятора YAP, дискриминатор импульсов D_2 (LeCroy 623), кабельная линия задержки ЛЗ и зарядово-цифровой преобразователь ЗЦП (LeCroy 2249A). Измерительная система управляется персональным компьютером ПК (IBM PC/AT-i486) через кейт-контроллер КК (КК009).

Долговременные исследования поведения параметров фотодетектора КВАЗАР-370G при больших постоянных анодных токах показывают, что даже при величине тока $\bar{I}_a \sim 100$ мкА за длительное время непрерывной экспозиции (≥ 140 суток, что соответствует ~ 7 – 8 годам проведения эксперимента) не происходит катастрофического падения усиления фотодетектора, тогда как его чувствительность остается практически постоянной [25]. Интересно отметить, что за первые 10 суток непрерывной экспозиции наблюдается рост усиления на $\sim 5\%$, затем происходит постепенное его падение. При этом усиление падает от максимума, достигнутого после 10–20 суток экспозиции, в 2.5 раза после последующих 120 суток работы ф.э.у. в таких условиях.

На рис. 3 представлены измеренные зависимости средней временной отметки \bar{t} и ее среднеквадратичного отклонения $\sigma_{\bar{t}}$ от среднего постоянного анодного тока фотодетектора \bar{I}_a . Величина \bar{I}_a определяется уровнем светового фона. На фотокатод фотодетектора подаются световые импульсы, образующие в среднем $\sim 10^3$ ф.э. в фотодетекторе. Значения величин \bar{t} и $\sigma_{\bar{t}}$ практически не

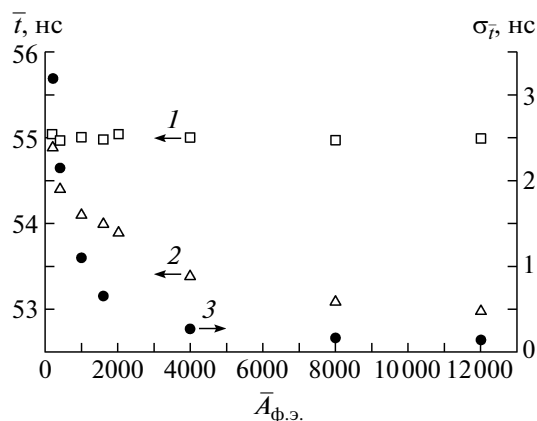


Рис. 4. Зависимости временной отметки \bar{t} (1 – с поправкой на амплитудную зависимость ФСП, 2 – без поправки) и ее среднеквадратичного отклонения $\sigma_{\bar{t}}$ (3) от средней амплитуды $\bar{A}_{\text{ф.э.}}$ выходных сигналов фотодетектора КВАЗАР-370G. Световой фон соответствует постоянному среднему анодному току $\bar{I}_a \sim 30$ мкА.

зависят от уровня светового фона при одном и том же уровне импульсной засветки (рис. 3).

Зависимости величин \bar{t} и $\sigma_{\bar{t}}$ от средней амплитуды $\bar{A}_{\text{ф.э.}}$ выходных сигналов фотоприемника $\bar{t}(\bar{A}_{\text{ф.э.}})$ и $\sigma_{\bar{t}}(\bar{A}_{\text{ф.э.}})$ при световом фоне, соответствующем $\bar{I}_a \sim 30$ мкА, представлены на рис. 4. Зависимость $\sigma_{\bar{t}}(\bar{A}_{\text{ф.э.}})$ хорошо аппроксимируется формулой

$$\sigma_{\bar{t}}(\bar{A}_{\text{ф.э.}}) = C_1 \sqrt{200/\bar{A}_{\text{ф.э.}}} + C_2(200/\bar{A}_{\text{ф.э.}}),$$

где $C_1 = 1.50 \pm 0.04$ нс, $C_2 = 1.70 \pm 0.05$ нс, $\bar{A}_{\text{ф.э.}}$ – средняя амплитуда сигнала, измеряемая в фотоэлектронах. При изменении средней амплитуды сигнала в 60 раз смещение средней временной отметки составляет $\Delta \bar{t} < 2$ нс, а среднеквадратичное отклонение временной отметки $\sigma_{\bar{t}}$ уменьшается более чем в 20 раз. В измеренных результатах необходимо ввести поправку на зависимость временной отметки, вырабатываемой формирователем со следящим порогом ФСП, от амплитуды входных сигналов. Эта зависимость была измерена с помощью генератора импульсов перестраиваемой формы в интересующем нас диапазоне изменения амплитуд импульсов. При учете амплитудной зависимости ФСП практически исчезает зависимость положения временной отметки \bar{t} от средней амплитуды сигналов $\bar{A}_{\text{ф.э.}}$ (см. рис. 4).

Результаты проведенных измерений показывают, что фотодетектор КВАЗАР-370G успешно работает при повышенных средних постоянных анод-

ных токах. Временные параметры фотодетектора остаются высокими в условиях светового фона ночного неба, что позволяет с успехом использовать эти фотодетекторы в широкоугольных черенковских детекторах ш.а.л.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить В.Ч. Лубсандоржиеву за внимательное прочтение рукописи и многочисленные ценные обсуждения и замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буднев Н.М., Васильев Р.В., Вишневецки Р. и др. // Изв. РАН. Сер. физ.. 2005. Т. 69. № 3. С. 343.
2. Буднев Н.М., Вишневецки Р., Гресс О.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71. № 4. С. 493.
3. Lubsandorzhiiev B.K. // Nucl. Instrum. and Methods A. 2008. V. 595. P. 73.
4. Karle A., Merck M., Plaga R. et al. // Astroparticle Physics. 1995. V. 3. P. 321.
5. Васильев Р.В., Гресс О.А., Корестелева Е.Е. и др. // ПТЭ. 2001. № 5. С. 51.
6. Stanev T. arXiv:1011.1879v1 [astro-ph.HE] 8 Nov 2010.
7. Chernov D., Kalmykov N., Korosteleva E. et al. // Intern. J. Mod. Phys. 2005. V. A20. P. 6796.
8. Antokhonov B.A., Beregnev S.F., Budnev N.M. et al. // Nucl. Instrum. and Methods A. 2010. V. 628. P. 124.
9. Tluczykont M., Kneiske T., Hampf D., Horns D. arXiv:0909.0445v1. [astro-ph.HE] 2 Sept 2009.
10. Lubsandorzhiiev B.K. // Nucl. Instrum. and Methods A. 2000. V. A442. P. 368.
11. Лубсандоржиев Б.К., Похил П.Г., Путилов О.А., Степаненко З.И. // ПТЭ. 2001. № 3. С. 155.
12. Bagduev R.I., Bezrukov L.B., Borisovets B.A. et al. // Proc. of the 2nd Intern. Conf. Trends in Astroparticle Physics. 10–12 October 1991. Aachen, Germany. P. 132.
13. Багдугев Р.И., Безруков Л.Б., Борисовец Б.А. и др. // Изв.РАН. Сер. физ. 1993. Т. 57. № 4. С. 135.
14. Lubsandorzhiiev B.K. // Proc. of the 25th ICRC. Durban. 1997. V. 7. P. 269.
15. Belolaptikov I.A., Bezrukov L.B., Borisovets B.A. et al. // Astroparticle Physics. 1997. V. 7. P. 263.
16. Lubsandorzhiiev B.K., Combettes B. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2008. V. 55. Issue 3. Part 2. P. 1333.
17. Безруков Л.Б., Глуховской Б.М., Лубсандоржиев Б.К. и др. // ПТЭ. 2000. № 1. С. 164.
18. Мелешко Е.А. Наносекундная электроника в экспериментальной физике. М.: Энергоатомиздат, 1987. С. 66.
19. Бессонова Н.А., Климов А.И., Мелешко Е.А., Морозов А.Г. Препринт ИАЭ-4177/14. М., 1985.
20. Васильев Р.В., Лубсандоржиев Б.К., Похил П.Г. // ПТЭ. 2000. № 4. С. 148.
21. Вятчин Е.Э., Лубсандоржиев Б.К. // ПТЭ. 2004. № 4. С. 80.
22. Lubsandorzhiiev B.K., Poleshuk R.V., Shaibonov B.A.M., Vyatchin Ye.E. // Nucl. Instrum. and Methods A. 2009. V. 602. P. 220.
23. Бессонова Н.А., Морозов А.Г. Препринт ИАЭ-4366/16. М., 1986.
24. Lubsandorzhiiev B.K., Pokhil P.G., Vasiliev R.V., P'yasov R.V. // Proc. of the 27th Intern. Cosmic Ray Conf. Hamburg, Germany. August 2001. V. 3. P. 1291.
25. Васильев Р.В., Кузьмичев Л.А., Лубсандоржиев Б.К., Похил П.Г. Препринт ИЯИ-1069/2001. М., 2001.