

На правах рукописи

Шайбонов Батор Александрович

**ДЕТЕКТОРЫ ФОТОНОВ И КАЛИБРОВОЧНЫЕ
СИСТЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ GERDA И ТУНКА**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте ядерных исследований РАН.

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук

Лубсандоржиев Баярто
Константинович

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук

Хренов Борис Аркадьевич
(НИИЯФ МГУ);

Кандидат физико-математических наук

Стенькин Юрий Васильевич
(ИЯИ РАН)

Ведущая организация:

Институт физики высоких энергий

Защита состоится « ____ » _____ 2010 г. в _____ часов на заседании

Диссертационного совета Д 002.119.01 Учреждения Российской академии наук Института ядерных исследований РАН по адресу: 117312 Москва, проспект 60-летия Октября 7а, тел. (499)135-21-24

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН

Автореферат разослан « ____ » _____ 2010 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета

Кандидат физико-математических наук

Тулупов Б.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Фотоника (наука, связанная с излучением, детектированием и распространением фотонов) все больше и больше расширяет свое влияние в экспериментальной физике. Фотонные методы сегодня – это наиболее широко распространенные методы в ядерно-физических экспериментах [Ю.К.Акимов 2006]. Эти методы занимают особое место в космомикрорфизических экспериментах. Присутствие фотонных методов или практически всех элементов фотоники в ядерно-физических экспериментах настолько велико, что предлагается по аналогии с ядерной электроникой объединить все эти методы в новую область экспериментальной физики – ядерную фотонику [Б.К.Лубсандоржиев. 2009].

Детекторы фотонов (вакуумные, газовые и твердотельные) являются основным инструментом подавляющего большинства космомикрорфизических экспериментов. В свою очередь, везде, где применяются детекторы фотонов, необходимо внедрение в состав экспериментов специальных калибровочных систем для контроля и мониторинга параметров фотодетекторов для получения точных и надежных экспериментальных данных. В состав калибровочных систем обязательно входят элементы фотоники – источники фотонов (лазеры, светодиоды, разрядные источники, черенковские источники и т.д.) и фотонные среды (световоды, оптоволоконные кабели, сцинтилляторы, радиаторы черенковского излучения и т.п.).

Даже в экспериментах, где основными детектирующими элементами служат не детекторы фотонов, а другие типы детекторов, например, полупроводниковые детекторы, не удастся полностью обойтись без детекторов фотонов, которые используются в каких-то вспомогательных системах экспериментов. Ярким примером такого использования детекторов фотонов является эксперимент GERDA по поиску двойного безнейтринного бета-распада ядер ^{76}Ge , который проводится в подземной лаборатории Gran

Sasso в Италии. Одно из основных требований эксперимента – чрезвычайно низкий уровень фона. Выполнение этого требования оказывается невозможным без создания детектора мюонного вето, позволяющего освободиться от фона космогенного происхождения. В этом детекторе мюонного вето используются детекторы фотонов, ультрачистая вода, сцинтилляторы и спектросмещающие оптоволоконные кабели. Кроме того, в детектор инкорпорирована калибровочная система, включающая в себя источники фотонов, оптоволоконные кабели и диффузные рассеиватели фотонов. Как видим, в эксперименте GERDA применяются практически все основные элементы фотоники.

Если обратиться к экспериментам, действующим на другом конце энергетической шкалы – например, эксперименты по исследованию первичного космического излучения в области энергий выше 10^{14} эВ, то мы снова увидим, что практически во всех экспериментах используются детекторы фотонов и другие элементы фотоники. Во многих экспериментах сама атмосфера используется в качестве фотонной среды, как в черенковском эксперименте ТУНКА. В калибровочных системах этого эксперимента применяются источники фотонов и оптоволоконные кабели.

Таким образом, в двух очень разных экспериментах, работающих в различных энергетических диапазонах, очень сильно различающихся по условиям проведения: в первую очередь по фоновым условиям, по условиям окружающей среды и т.д., элементы фотоники или фотонные методы играют ключевую роль. Исследованию детекторов фотонов экспериментов GERDA и ТУНКА и разработке и созданию калибровочных систем этих экспериментов и посвящена данная диссертационная работа.

Цель работы. Целью настоящей работы являлось разработка и создание измерительных стендов для исследования, тестирования и отбора фотодетекторов эксперимента по поиску двойного безнейтринного бета-распада ядер Ge^{76} GERDA и эксперимента по исследованию первичного

космического излучения ТУНКА, разработка оптического модуля черенковского детектора мюонного вето эксперимента GERDA, разработка и создание калибровочных систем данных экспериментов, а также исследование параметров основных элементов этих систем.

Научная новизна и практическая ценность работы. В ходе выполнения настоящей работы были разработаны и созданы оптический модуль и калибровочная система черенковского детектора мюонного вето эксперимента GERDA, а также калибровочная система эксперимента ТУНКА. Результаты данной работы активно используются в космомикрoфизических экспериментах.

Основные результаты, представленные к защите.

Основными результатами, представленными к защите, являются разработка и создание калибровочных систем черенковского детектора мюонного вето эксперимента GERDA и эксперимента ТУНКА. Разработка методов исследования, тестирования и отбора основных элементов калибровочных систем и фотодетекторов этих экспериментов.

Апробация работы. Результаты и выводы, содержащиеся в диссертации, докладывались на межрегиональных конференциях по физике космических лучей в г.Москве в 2008 г., на международной конференции по физике космических лучей в 2007 (Мерида, Мексика), на международных конференциях по фотодетектированию в 2006г. (Бон, Франция) и 2008г. (Акс-ле-Бан, Франция), на совещаниях коллаборации GERDA.

Публикации. Сущность и новизна исследований, выполненных по теме данной диссертации, изложены в статьях, опубликованных в журналах Приборы и Техника Эксперимента, Nuclear Instruments and Methods A, в трудах Российских и международных конференций по физике космических лучей. Всего по теме диссертации опубликовано 15 работ из них 7 в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав и

заклучения. Общее количество страниц составляет 153, рисунков – 119 и таблиц – 1. Список литературы включает 103 наименования.

Вклад автора. Автором непосредственно разработаны и созданы измерительные стенды для отбора и тестирования фотодетекторов эксперимента по поиску двойного безнейтринного бета-распада GERDA и эксперимента по исследованию первичного космического излучения ТУНКА. Лично автором проведены исследование, отбор и тестирование фотодетекторов этих экспериментов. При непосредственном активном участии автора разработан оптический модуль черенковского детектора мюонного вето эксперимента GERDA. Автором также разработаны и созданы калибровочные системы экспериментов GERDA и ТУНКА, основанные на разработанных автором источниках наносекундных световых импульсов на базе светодиодов высокой мощности. Вклад автора был определяющим в разработке и создании всех элементов калибровочных систем экспериментов GERDA и ТУНКА.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** показывается, что элементы фотоники играют огромную роль в современных ядерно-физических, особенно в космофизических экспериментах. Это детекторы и источники фотонов и фотонные среды. По существу формируется новая область экспериментальной науки – ядерная фотоника, объединяющая все элементы фотоники и фотонные методы, использующиеся в ядерно-физических экспериментах. Обсуждается актуальность, научная новизна и практическая ценность диссертационной работы. Приводятся основные положения, которые выносятся на защиту, и сведения о том, как данная диссертация прошла апробацию.

В **первой главе** дается описание детекторов фотонов черенковского детектора мюонного вето эксперимента GERDA по поиску двойного безнейтринного бета распада ядра ^{76}Ge . Эксперимент GERmanium Detector Array (GERDA) ведется для поиска двойного безнейтринного β -распада ядра

^{76}Ge . Для достижения низкофоновых условий проводится в подземной лаборатории LNGS в Италии на глубине ~3400 метров водного эквивалента.

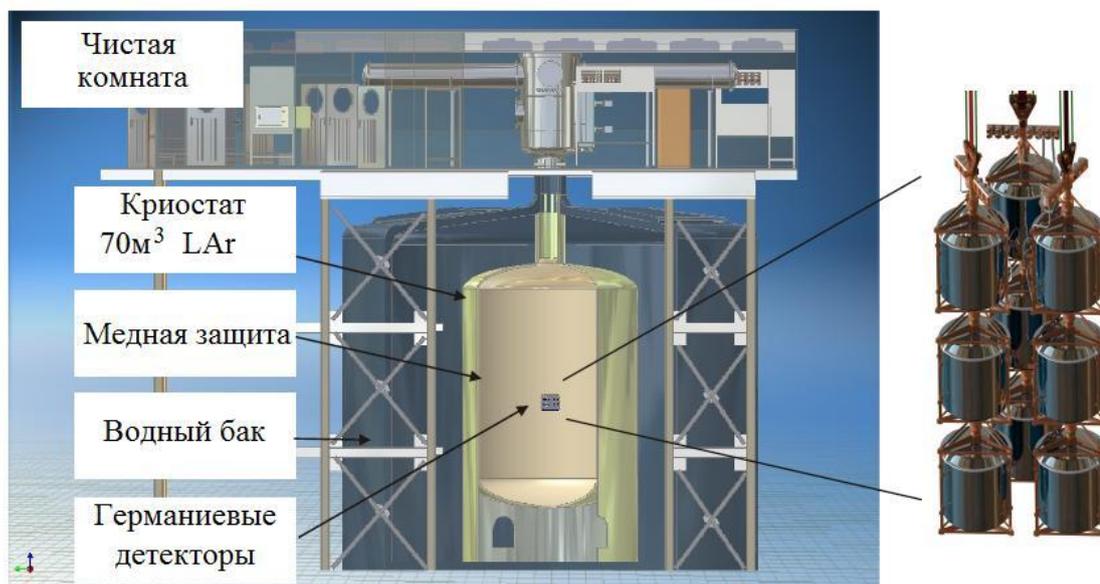


Рис. 1. Эскиз эксперимента GERDA. В правой части рисунка, показаны германиевые детекторы эксперимента.

Эскиз экспериментальной установки эксперимента GERDA показан на рис. 1. Несмотря на то, что поток мюонов космических лучей на глубине расположения детектора ослаблен почти в 10^6 раз по сравнению с потоком на поверхности, мюоны космических лучей вносят существенный вклад в фоновые события. Для эффективного подавления фона, обусловленного мюонами космических лучей, криостат с германиевым детектором окружен водным черенковским детектором мюонного вето. Этот детектор представляет собой бак из нержавеющей стали высотой 9,4 м и диаметром 10 м. Объем, образованный внутренними стенками бака и внешней стенкой криостата, заполнен ультрачистой водой для пассивной защиты от гамма-квантов и нейтронов и активной защиты от мюонов космических лучей. Общий объем воды в детекторе равен $\sim 650 \text{ м}^3$. Черенковский детектор мюонного вето состоит из 66 оптических модулей на базе фотоэлектронных

умножителей ET9350KB и ET9354KB с полусферическими фотокатодами диаметром 20 см. Оптические модули устанавливаются на стене и дне водного бака. На рис. 2 показана схема-развертка расположения оптических модулей детектора.

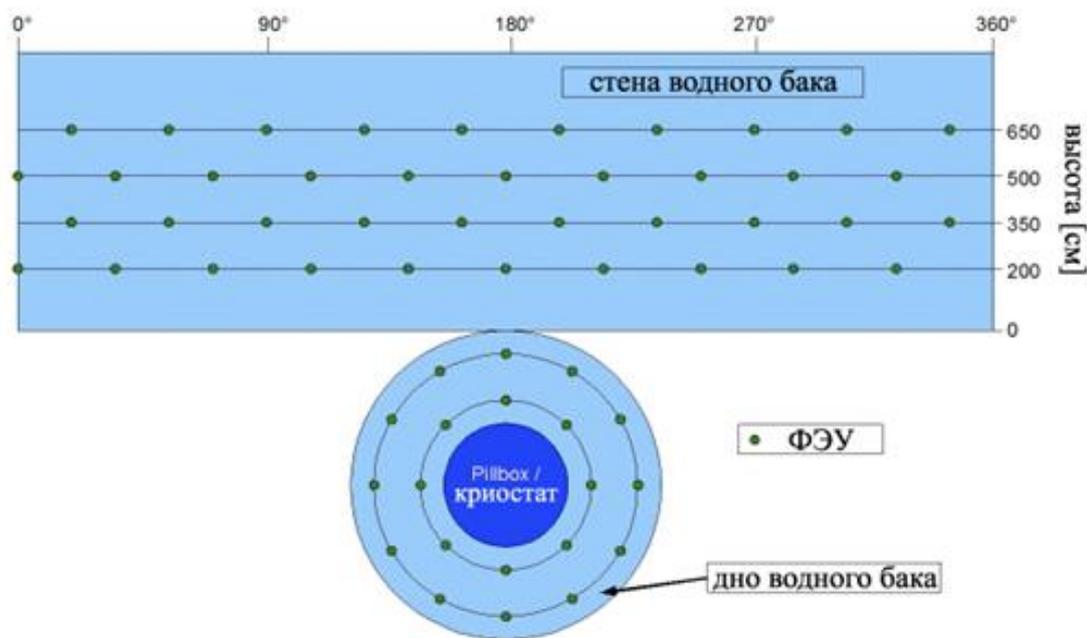


Рис. 2. Схема-развертка расположения оптических модулей в водном баке черенковского детектора мюонного вето эксперимента GERDA.

Фотоэлектронные умножители ET9350KB и ET9354KB производства компании Electron Tubes Enterprises были выбраны для использования в оптических модулях детектора. Для тестирования, отбора и исследования параметров фотоумножителей разработан специализированный измерительный стенд, успешно эксплуатирующийся на протяжении ряда лет в лаборатории университета г.Тюбинген в Германии. Фотоэлектронные умножители ET9350KB и ET9354KB – это фотоумножители с фотокатодом полусферической формы диаметром 20 см. Материал фотокатода – бищелочной K_2CsSb , что обеспечивает чувствительность фотоумножителей в области спектра 300-650 нм с максимумом чувствительности при $\lambda_{max} \sim 360-$

380 нм. При этом квантовая эффективность в максимуме чувствительности составляет 27-30%. Коэффициент усиления всех фотоумножителей в детекторе устанавливается равным $\sim 10^7$. Материал динодов – SbCs_3 . Эмиттер первого динода дополнительно обрабатывается цезием для увеличения коэффициента вторичной эмиссии σ . Это позволило увеличить величину σ до 10 и более. Применение высокоэффективных эмиттеров дает возможность достичь высокого коэффициента усиления при относительно небольших значениях напряжения питания ФЭУ. В силу высокого усиления первого каскада данный ФЭУ характеризуется хорошим однофотоэлектронным откликом. В зарядовом спектре однофотоэлектронных импульсов наблюдается четкий пик. Значения отношения пик/ долина этого спектра для исследованных ФЭУ лежат в пределах $P/V=1,6-3,1$. Распределение времен пролета фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода характеризуется шириной на половине высоты $\Delta t_{\text{fwhm}}=2,1-3,1$ нс. Вероятность образования предимпульсов и задержанных импульсов для этих ФЭУ составляет $\sim 2\%$ и $\sim 5\%$ соответственно. Скорость счета импульсов темнового тока ФЭУ при рабочем напряжении не превышает 10 кГц при температуре в баке $\sim 18-19$ °С. Вероятность образования послеимпульсов на один фотоэлектрон меньше 10%. На рис. 3а, б, в и г показаны распределения исследованных ФЭУ по различным параметрам.

Фотография оптического модуля детектора, разработанного на базе ФЭУ ET9350KB и ET9354KB, представлена на рис. 4. Фотоумножители вместе с делителями напряжения питания фиксируются в кожухе из нержавеющей стали. На внутренней конической части кожуха фиксируется конус из специального сплава с высоким значением магнитной проницаемости μ для экранировки ФЭУ от магнитного поля Земли. Фотокатод ФЭУ закрыт PЕТ иллюминатором. Оптический модуль залит минеральным маслом и герметизирован.

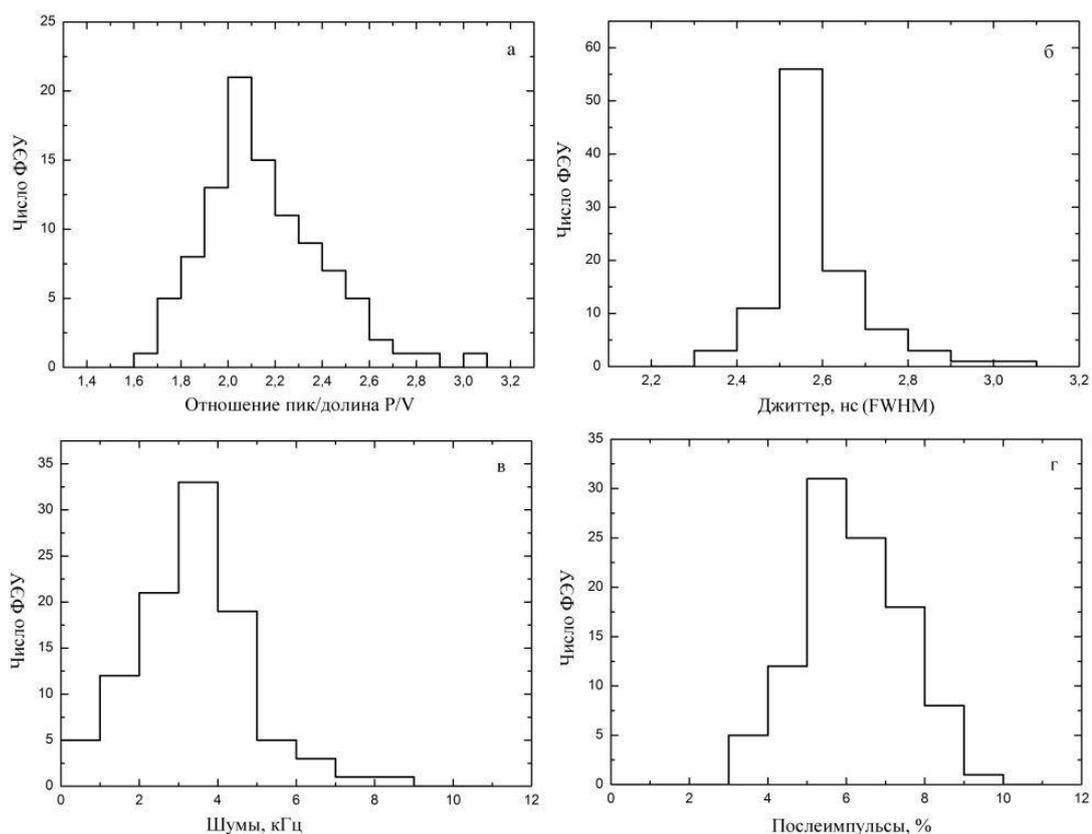


Рис. 3. Распределения измеренных ФЭУ по различным параметрам: отношению пик/долина (а); разбросу времен пролета фотоэлектронов (б); скорости счета импульсов темного тока при уровне дискриминации сигналов $0,25 Q_{1фэ}$ (в); и вероятности появления послеимпульсов на один фотоэлектрон (г).



Рис. 4. Фотография оптического модуля черенковского детектора мюонного вето эксперимента GERDA.

Во **второй главе** диссертации представлено описание калибровочной системы черенковского детектора мюонного вето эксперимента GERDA. Калибровочная система детектора состоит из двух частей. В первой части оптические модули детектора засвечиваются через пластиковые оптоволоконные кабели COMAR 01 FS 20 – один кабель для каждого оптического модуля. Оптоволоконные кабели засвечиваются одним источником наносекундных импульсов света, который состоит из ультраяркого светоизлучающего диода (светодиода) и формирователя импульсов запуска светодиода. Для этого источника подобран светодиод с высоким световыходом и в тоже время с быстрой кинетикой свечения без медленной компоненты - светодиод YM-BV5S15N с максимумом излучения $\lambda_{\text{max}} = 470$ нм. На рис. 5а показана кинетика свечения этих светодиодов при прохождении наносекундных импульсов тока. Диапазон изменения амплитуды светового сигнала составляет $0 \div 10^8$ фотонов в импульсе. При этом длительность светового импульса изменятся в диапазоне $2,0 \div 3,0$ нс.

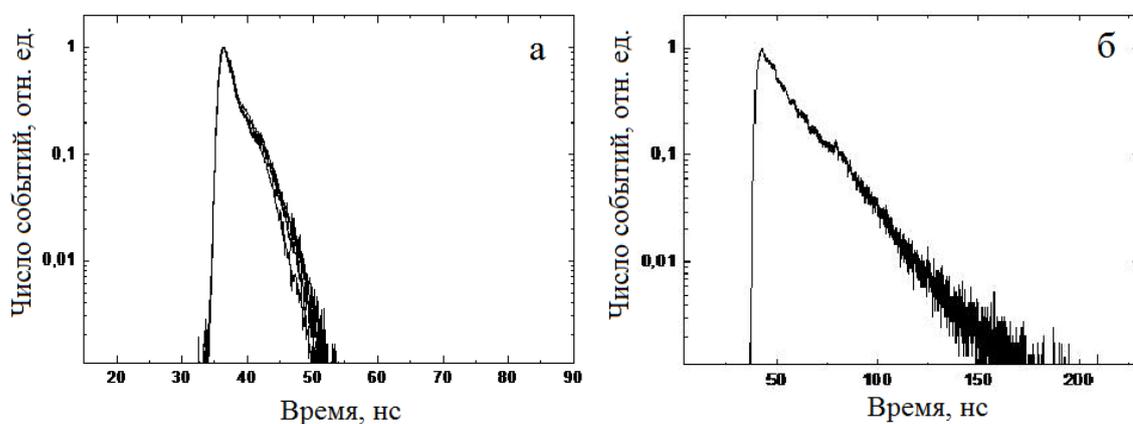


Рис. 5. Кинетика свечения источников световых импульсов калибровочной системы черенковского детектора мюонного вето эксперимента GERDA: а) – источник света на базе ультраяркого светодиода YM-BV5S15N; б) – источник на основе светодиода высокой мощности LXHL-NB98

Во второй части калибровочной системы предусматривается засветка одновременно всех ФЭУ детектора через воду от одного источника с помощью пяти оптоволоконных кабелей и сферических диффузных рассеивателей света. Четыре рассеивателя подвешиваются на половине высоты бака и на равном расстоянии друг от друга и от вертикальных стенок бака и криостата. Пятый рассеиватель установлен непосредственно под криостатом. Источник световых импульсов основан на синем светодиоде высокой мощности LXHL-NB98 с формирователем импульсов запуска на базе лавинных транзисторов. Форма светового импульса источника представлена на рис. 5б. Длительность светового импульса и световыход источника составляют $\Delta t_{\text{fwhm}} = 5$ нс и $\sim 10^{11}$ фотонов соответственно.

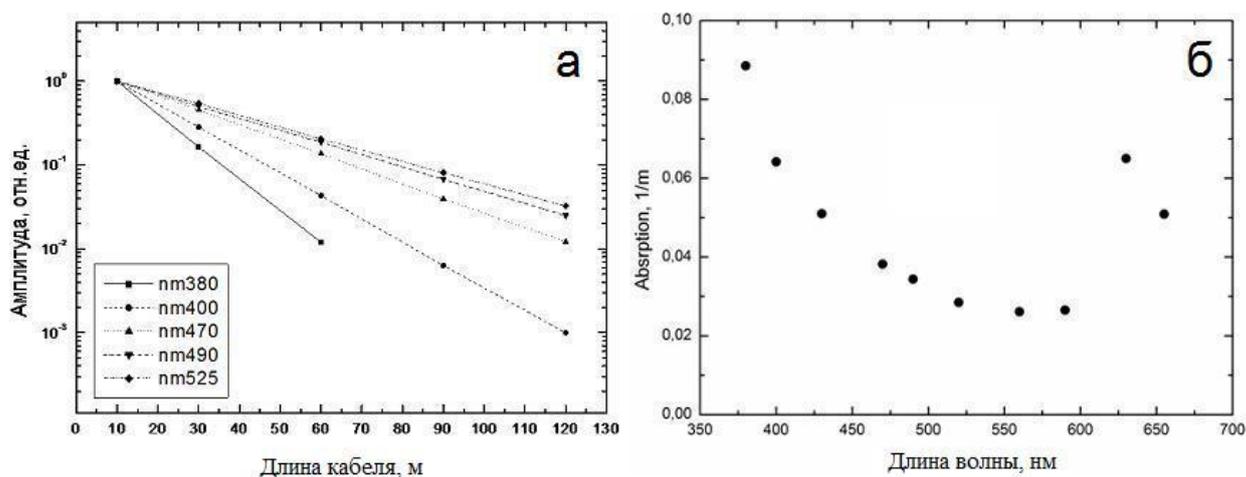


Рис. 6. Зависимости амплитуды световых импульсов от длины кабеля для различных длин волн (а) и коэффициента ослабления сигналов от длины волны (б).

Ослабление световых импульсов при прохождении пластиковых оптоволоконных кабелей сильно зависит как от длины кабеля, так и от длины волны света. На рис. 6а представлены зависимости амплитуды световых импульсов от длины кабеля, измеренные для различных длин волн света. На рис. 6б показано как коэффициент поглощения света зависит от длины волны. Минимальное ослабление сигнала достигается в

диапазоне длин волн 530-600 нм. Наблюдается довольно резкий рост ослабления сигнала в области длин волн 620-650 нм.



Рис. 7. Эскиз (а) и фотография (б) диффузного рассеивателя света калибровочной системы черенковского детектора мюонного вето эксперимента GERDA.

Во второй части калибровочной системы оптические модули засвечиваются напрямую через воду. Для этого в объеме бака устанавливаются пять сферических диффузных рассеивателей – диффузных шаров (“diffusing balls”), закрепленных на концах оптоволоконных кабелей. Диффузные шары представляют собой стеклянные сферы диаметром ~5 см, наполненные светорассеивающей средой. Четыре диффузных шара устанавливаются в середине бака, а пятый под криостатом в “pill-box”. Эскиз и фотография диффузного рассеивателя показаны на рис. 7а и б соответственно. Светорассеивающая среда выполнена на основе стеклянных микросфер S32 (диаметр микросфер – 5 мкм), равномерно распределенных в кремнийорганическом геле. Разработанная технология изготовления таких диффузных рассеивателей света позволяет получить недорогие рассеиватели высокого качества в лабораторных условиях. Уровень изотропности светового излучения после прохождения рассеивателя <10%. 5 диффузных рассеивателей установлены в водном баке черенковского детектора мюонного вето эксперимента GERDA.

В третьей главе диссертации описываются детекторы фотонов эксперимента ТУНКА по исследованию первичного космического излучения в диапазоне энергий 10^{15} - 10^{18} эВ.

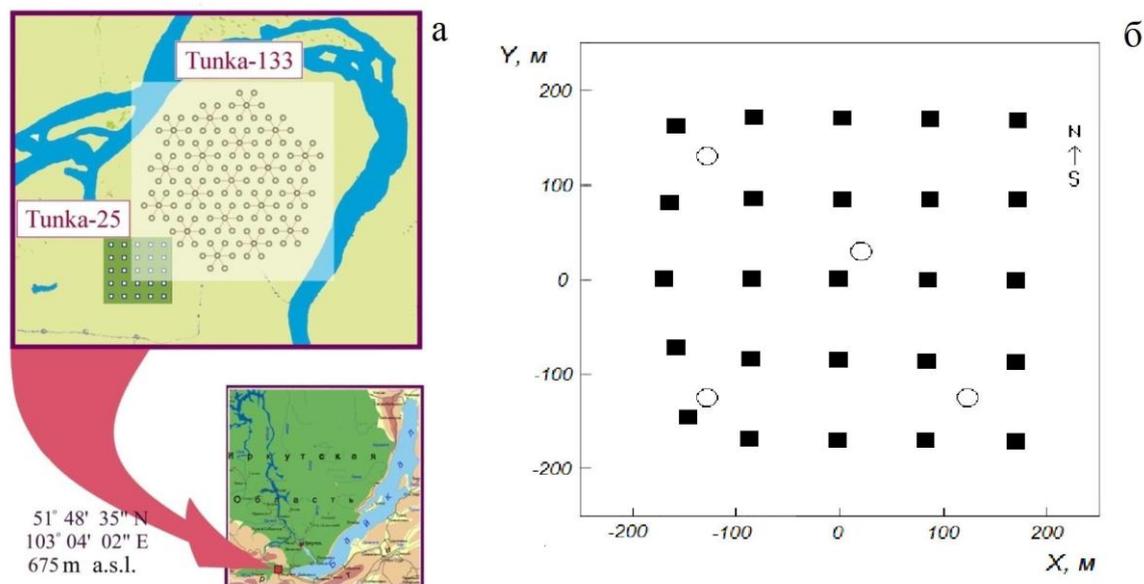


Рис. 8. Схема расположения детекторов ТУНКА-133 и ТУНКА-25 в эксперименте ТУНКА (а), схема детектора ШАЛ ТУНКА-25 (б): ■ – базовые оптические модули на основе гибридных фотодетекторов КВАЗАР-370G; ○ – оптические модули на основе ФЭУ Thorn-EMI D668KB/5 для регистрации формы черенковского импульса ШАЛ.

Широкоугольный черенковский детектор широких атмосферных ливней (ШАЛ) ТУНКА успешно работает с 1994 года. Детектор расположен в Тункинской долине в Республике Бурятия в 50 км от озера Байкал на высоте 675 м над уровнем моря. Общая схема расположения эксперимента приведена на рис. 8а. Комплексная установка ТУНКА-25, рис. 8б, состоит из 25 интегральных оптических модулей на базе фотодетекторов Квазар-370G и четырех дополнительных оптических модулей на базе быстродействующих фотоумножителей Thorn-EMI D668KB/5 для исследования формы черенковского импульса ливней. Регистрация формы импульса черенковского света ШАЛ на больших расстояниях от оси ливня является

эффективным инструментом изучения массового состава первичных космических лучей.

В ФЭУ Thorn-EMI D668KB/5 используются полусферический фотокатод диаметром ~20 см и диодная система с линейной фокусировкой с шестью каскадами умножения. Большой площади первый диод системы изготовлен из высокоэффективного эмиттера $SbCs_3$, с коэффициентом вторичной эмиссии $\sigma \sim 10$. Остальные диоды выполнены из сплава CuBe для надежной работы при больших постоянных токах. Фотокатод бищелочной K_2CsSb . Максимум чувствительности фотокатода достигается на длине волны $\lambda_{max} = 360-380$ нм. Квантовая эффективность фотокатода в максимуме чувствительности составляет ~23%. Долговременные исследования поведения параметров ФЭУ при больших постоянных анодных токах показывают, что даже при постоянном анодном токе $I_a = 100$ мкА за длительное время экспозиции не происходит существенных ухудшений основных параметров ФЭУ: в первую очередь, усиления и чувствительности.

Для передачи выходных аналоговых сигналов ФЭУ на значительные расстояния без существенного ослабления и искажения сигнала и для защиты от электромагнитных помех была разработана система передачи и приема выходных сигналов оптического модуля по оптоволоконному кабелю. Функциональная схема электронных узлов системы показана на рис. 9. Электрический анодный сигнал ФЭУ преобразуется в оптический и передается по одномодовому оптоволоконному кабелю в центральный электронный пункт установки, где происходит обратное преобразование оптического сигнала в электрический. На рис. 10 показаны выходные импульсы ФЭУ Thorn-EMI D668KB/5 до и после прохождения оптоволоконного кабеля длиной 400 м. Форма анодных импульсов ФЭУ практически не претерпевают каких-либо существенных изменений после прохождения оптоволоконного кабеля.

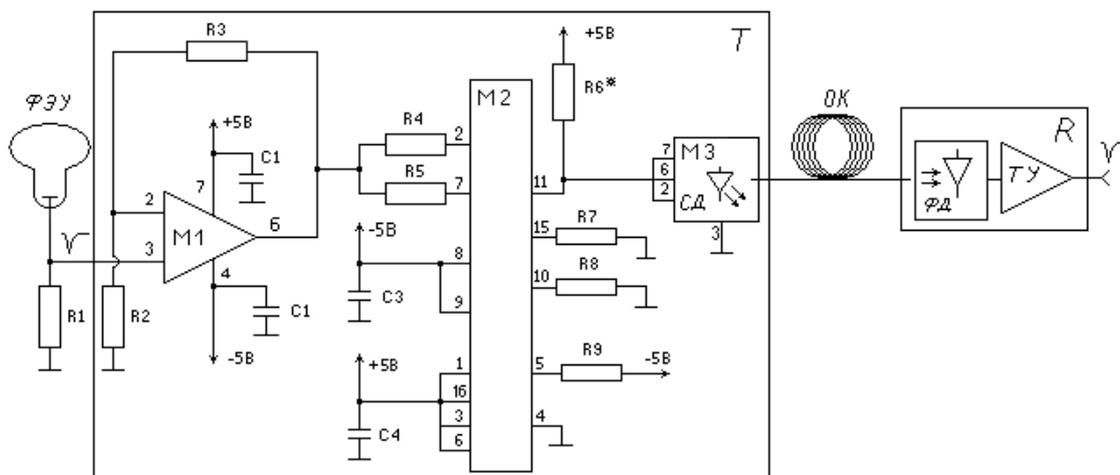


Рис. 9. Функциональная схема системы передачи выходных сигналов детектора по регистрации формы черенковского импульса ШАЛ по оптоволоконному кабелю. ФЭУ – фотоэлектронный умножитель THORN-EMI D668KB/5; T – передатчик-преобразователь электрических импульсов в оптические; ОК – оптоволоконный кабель UB04-080U-W; R – приемник-преобразователь оптических импульсов в электрические.

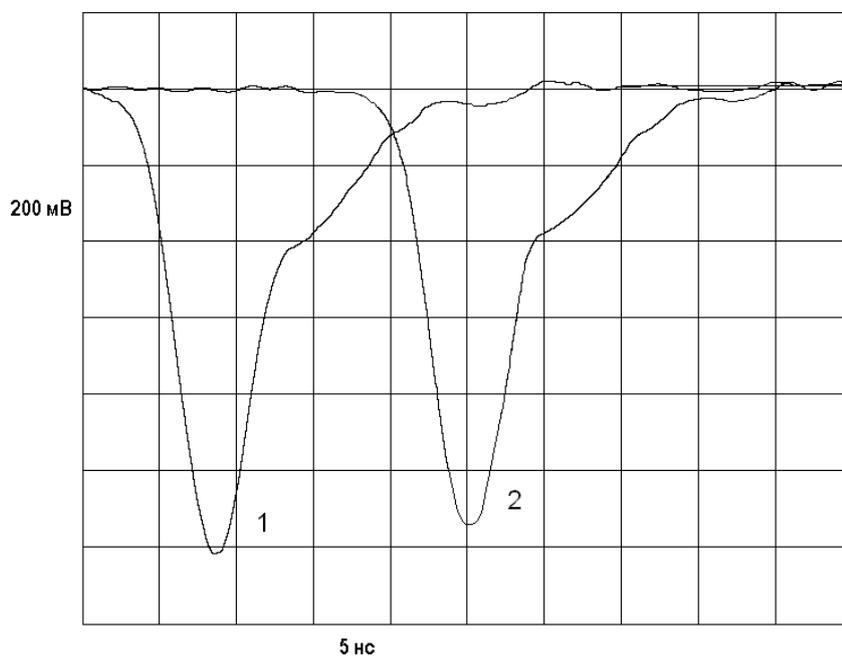


Рис. 10. Форма импульса оптического модуля установки на базе ФЭУ THORN-EMI D668KB/5 до (1) и после (2) прохождения оптоволоконного кабеля длиной 400 м.

Для исследования первичного космического излучения в широком энергетическом диапазоне $10^{15} \div 10^{18}$ эВ с 2006 года началось создание черенковского детектора ТУНКА-133 геометрической площадью 1 км^2 с 133-ю оптическими пунктами на базе быстродействующих ФЭУ Thorn-EM19350KB. Оптические пункты объединены в 19 кластеров, по 7 детекторов в каждом кластере. Шесть детекторов одного кластера расположены в вершинах правильного шестиугольника и один в геометрическом центре шестиугольника. Расстояние между детекторами - 85 м.

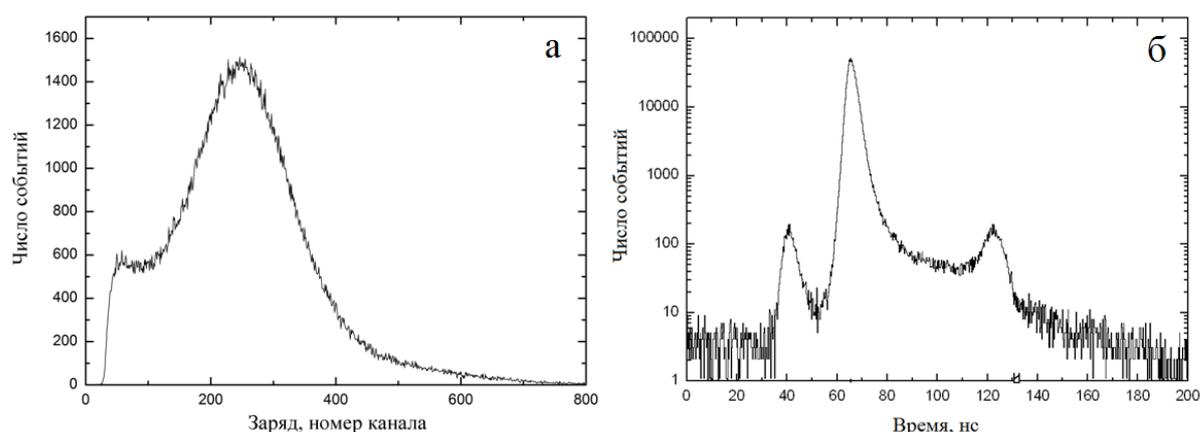


Рис. 11. ФЭУ Thorn-EM19350KB; а) – зарядовое распределение однофотоэлектронных импульсов; б) – распределение времен пролета фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода.

Thorn-EM19350KB – это ФЭУ с полусферическим фотокатодом диаметром 20 см. Используется бищелочной фотокатод K_2CsSb . Максимум спектральной чувствительности достигается при длине волны $\lambda_{\text{max}} = 380\text{-}400$ нм. Квантовая эффективность в максимуме чувствительности составляет $\sim 20\text{-}25\%$. Динодная система с линейной фокусировкой состоит из 14 каскадов усиления. Время нарастания выходного импульса этого ФЭУ составляет 4 нс, а его длительность – 10 нс. В зарядовом спектре однофотоэлектронных импульсов наблюдается ярко выраженный пик, рис. 11а. Типичные значения отношения пик/ долина этого спектра лежат в пределах $P/V=1,3\text{-}2,5$.

Распределение времен пролета фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода характеризуется шириной на половине высоты $\Delta t_{\text{fwhm}}=2,8-3,5$ нс, рис. 11б. В этом распределении отчетливо видны пики предимпульсов и задержанных импульсов. Вероятность появления предимпульсов составляет $\sim 1\%$, а задержанных импульсов - $\sim 4-5\%$. Вероятность возникновения послеимпульсов не превышает 15%.

Планируется дополнить установку ТУНКА-133 20-ю сцинтилляционными счетчиками площадью 10 м^2 каждый для регистрации мюонной компоненты ШАЛ. В этих счетчиках будут применены полусферические ФЭУ R1408-06 производства фирмы Hamamatsu. R1408-06 – это ФЭУ с полусферическим фотокатодом диаметром 20 см. В отличие от ЕМІ9350КВ в R1408-06 используется жалюзийная 14-каскадная диодная система. Такая диодная система, несмотря на использующиеся эмиттеры (CuBe(Cs)) с относительно высоким коэффициентом вторичной эмиссии, отличаются малой эффективностью регистрации фотоэлектронов из-за значительного эффекта пролета фотоэлектронов. В силу этого в зарядовом спектре однофотоэлектронных импульсов фотоумножителя R1408-06 отсутствует пик, обусловленный вылетом одного фотоэлектрона с фотокатода ФЭУ. На рис. 12а представлен типичный зарядовый спектр однофотоэлектронных импульсов этого ФЭУ. Фотокатод используется бищелочной K_2CsSb с максимумом чувствительности, достигающемся в диапазоне длин волн 380-420 нм. Квантовая эффективность фотокатода в максимуме чувствительности составляет $\sim 20-25\%$. Таким образом, чувствительность данного ФЭУ хорошо соответствует спектру излучения пластикового сцинтиллятора, планирующегося для использования в эксперименте. Распределение времен пролета фотоэлектронов этого ФЭУ при однофотоэлектронной засветке фотокатода характеризуется шириной на половине высоты $\Delta t_{\text{fwhm}}= 5$ нс, рис. 12б. В распределении отчетливо видны пики предимпульсов и задержанные импульсы, вероятности появления

которых составляют ~1% и ~4% соответственно. Уровень послеимпульсов в этом ФЭУ не превышает 15%.

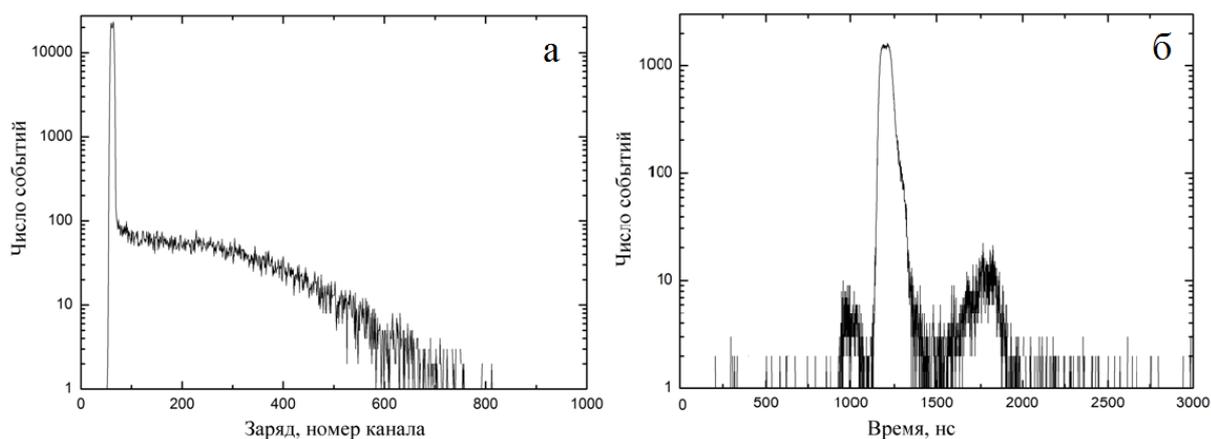


Рис. 12. ФЭУ R1408-06; а) – зарядовое распределение однофотоэлектронных импульсов; б) – распределение времен пролета фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода.

Четвертая глава посвящена калибровочным системам эксперимента ТУНКА. Как и во всяком другом эксперименте, где применяются фотодетекторы, для контроля параметров фотодетекторов и электронных систем необходимо внедрение в состав эксперимента калибровочных систем для контроля и мониторинга основных параметров фотодетекторов – усиления, чувствительности и т.д.. В эксперименте ТУНКА калибровочные измерения фотодетекторов оптических пунктов усложняются значительными расстояниями между оптическими пунктами. Нами разработана простая в эксплуатации, достаточно надежная и недорогая в изготовлении система для этих целей. Система калибровки времени срабатывания оптических пунктов черенковского детектора широких атмосферных ливней ТУНКА состоит из источника световых импульсов наносекундной длительности и пластикового оптоволоконного кабеля. Принципиальная электрическая схема источника света представлена на рис. 13а. Используется светодиод LDBK13633L6, который характеризуется повышенной яркостью (17 кд), излучением в узком

угле ($\sim 8^\circ$) и быстрой кинетикой свечения ($\Delta t_{FWHM} \sim 2$ нс) практически без медленной компоненты. На рис. 13б показаны формы световых импульсов, измеренные методом счета коррелированных во времени фотонов, 15-ти образцов данного светодиода в калибровочном источнике света эксперимента ТУНКА.

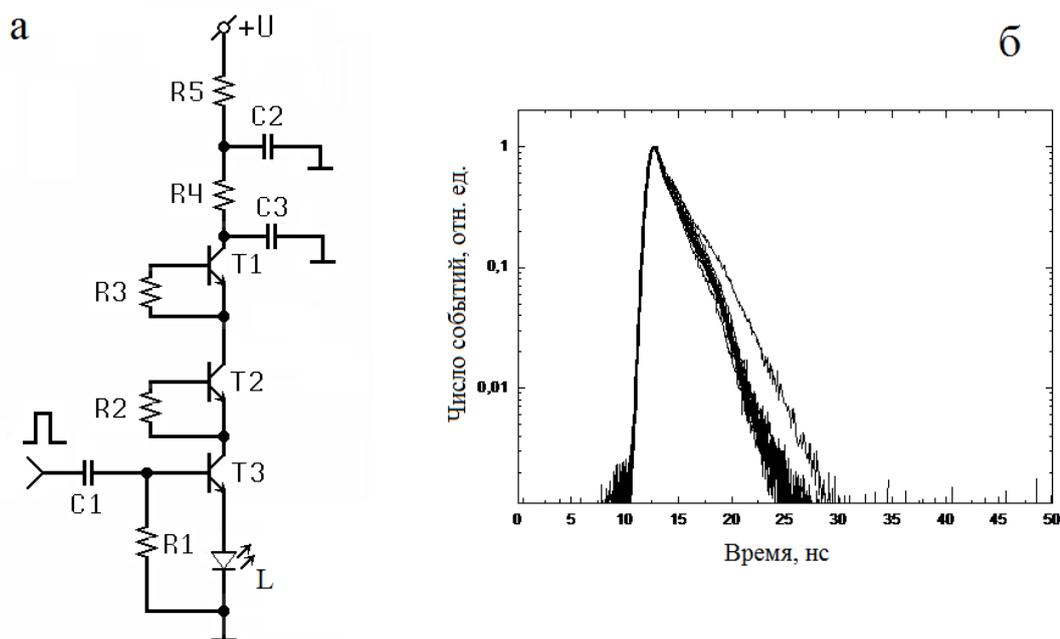


Рис. 13. а) наносекундный источник световых импульсов калибровочной системы эксперимента ТУНКА-25. Т1, Т2, Т3 – ZTX415; С1, С2 – 100 нФ; С3 – 27 пФ; R1, R2, R3 – 51 Ом; R4 – 68 кОм; R5 – 10 кОм; L – LDBK13633L6. б) кинетика свечения светодиодов LDBK13633L6.

Для передачи световых импульсов источника к фотодетекторам оптических пунктов используется пластиковый оптоволоконный кабель SIEMENS CUPOFLEX с сердцевиной из полиметилметакрилата диаметром 980 мкм и внешней оболочкой из флуорированного полиметилметакрилата толщиной 10 мкм. Длина кабеля составляет ~ 240 м. При сеансе временной калибровки наносекундный источник света фиксируется в центральном электронном пункте детектора, а оптоволоконный кабель протягивается к каждому индивидуальному оптическому пункту. Уровень засветки

фотодетекторов оптических пунктов составляет ~ 1000 фотоэлектронов при длительности светового импульса после прохождения оптоволоконного кабеля <15 нс. Временная отметка, вырабатываемая индивидуальным оптическим пунктом, измеряется относительно синхроимпульса источника света в центральном пункте электроники. Точность временной привязки синхросигнала и выходных сигналов оптических пунктов, обусловленных сигналами от калибровочного источника света, составляет ~ 50 пс.

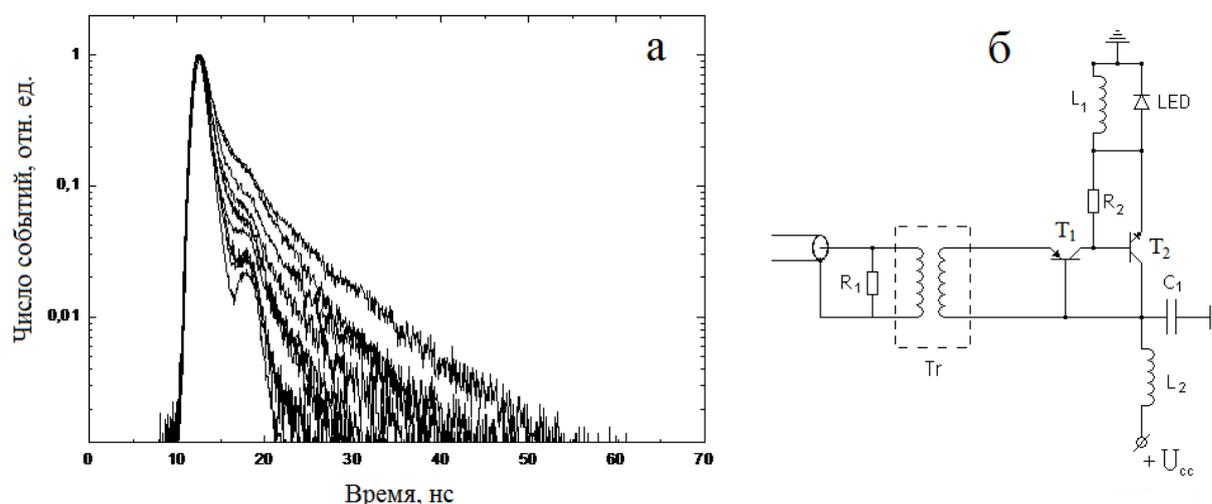


Рис. 14. а) кинетика свечения светодиодов GNL-3014BC; б) принципиальная электрическая схема источника световых импульсов наносекундной длительности оптического пункта эксперимента ТУНКА-133: T_1 – BFT92; T_2 – BFR92; L_1 – 100 нГн; L_2 – 100 мкГн; R_1 – 50 Ом; R_2 – 10 кОм; C_1 – 100 пФ; Tr – MCL0536 ADT1.

В эксперименте ТУНКА-133 предусмотрено две системы калибровки оптических пунктов. В первом случае каждый оптический пункт снабжен наносекундным источником света, который управляется из электронного пункта кластера. Для этой цели разработан источник света на основе ультраяркого голубого светодиода GNL-3014BC. Светодиоды этой марки отличаются большим разбросом кинетики свечения, рис. 14а. Однако, среди них обнаружены образцы с самой быстрой кинетикой свечения среди всех измеренных светодиодов различных типов. Для использования в

калибровочной системе отобраны образцы светодиодов с быстрой кинетикой. Принципиальная схема источника изображена на рис. 14б. Источник обладает большим диапазоном изменения амплитуды светового сигнала источника – $0 \div 10^{10}$ фотонов в импульсе. При этом длительность светового импульса изменяется в диапазоне $3 \div 7$ нс.

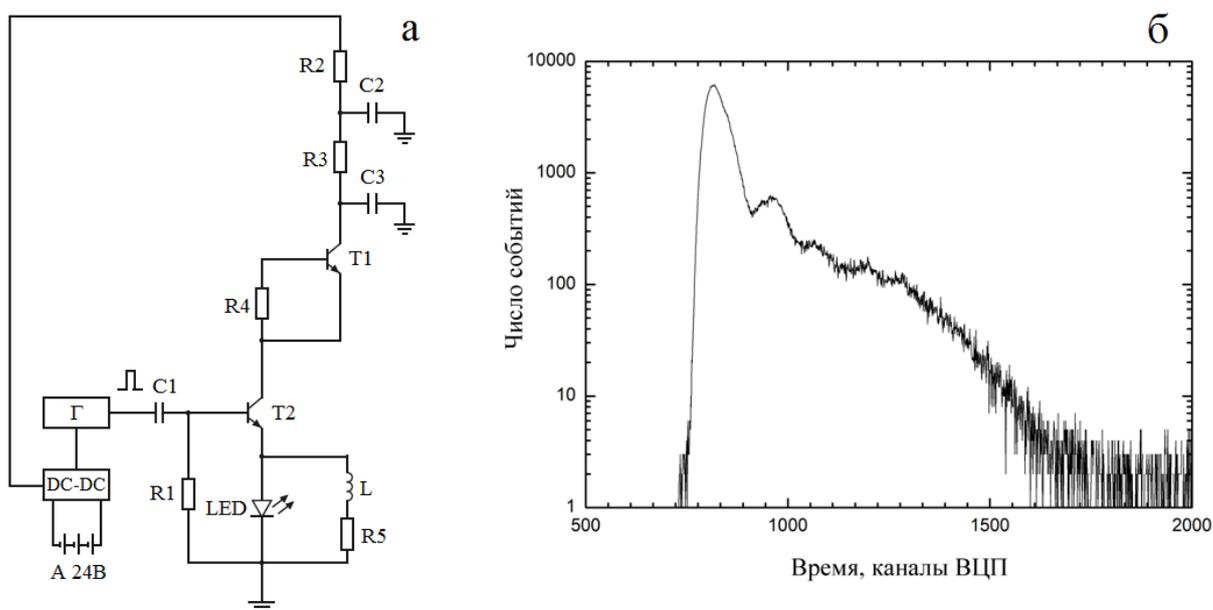


Рис. 15. а) источник световых импульсов наносекундной длительности для калибровки всего детектора ТУНКА-133: Г – генератор импульсов; DC-DC – преобразователь напряжения питания; А – аккумуляторная батарея; T1 и T2 – FMТ415; R1 и R4 – 51 Ом; R2 – 10 кОм; R3 – 68 кОм; R5 – 30 Ом; L – 100 нГн; C1 и C2 – 100 нФ; C3 – 120 пФ; LED – XR7090; б) кинетика свечения источника световых импульсов наносекундной длительности на базе светодиода высокой мощности XR7090, разработанного для калибровки эксперимента ТУНКА-133.

Для калибровки всей установки предлагается система, основанная на мощном светодиодном источнике наносекундных световых импульсов. Такой источник может быть поднят над установкой на воздушном шаре, наполненном гелием. Предусматривается и второй вариант, когда источник света закрепляется на шесте на высоте нескольких метров. В обоих случаях будут применяться мощные наносекундные источники световых импульсов,

схема которых приведена на рис. 15а. Такие источники включают в себя источник световых импульсов на базе светодиода высокой мощности XR7090, генератор импульсов запуска источника света, преобразователь напряжений питания для источника света, генератор импульсов запуска и модули определения координат GPS и радиообмена Xbee-Pro. Световыход источника составляет $\sim 10^{12}$ фотонов в импульсе при длительности импульса $\Delta t_{\text{fwhm}} = 4,2$ нс. На рис. 15б показана кинетика свечения данного источника.

В заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы:

Разработан и создан измерительный стенд для отбора и тестирования фотоэлектронных умножителей черенковского детектора мюонного вето эксперимента GERDA по поиску безнейтринного двойного бета-распада ядра ^{76}Ge . Проведены отбор фотоэлектронных умножителей для использования в этом эксперименте и исследованы их параметры.

Разработан и создан оптический модуль черенковского детектора мюонного вето эксперимента GERDA.

Разработана и создана калибровочная система черенковского детектора мюонного вето эксперимента GERDA на основе наносекундных источников световых импульсов и системы пластиковых оптоволоконных кабелей и диффузных рассеивателей света.

Разработана и создана система измерения формы импульса черенковского излучения широких атмосферных ливней эксперимента ТУНКА на базе быстродействующего фотоэлектронного умножителя Thorn-EMI D668KB/5 с использованием метода передачи аналогового сигнала по оптоволоконному кабелю.

Исследованы свойства фотоэлектронных умножителей Thorn-EMI9350KB и R1408-06. Показана возможность их использования в черенковском и сцинтилляционном детекторах эксперимента ТУНКА-133.

Предложена калибровочная система черенковского эксперимента по

исследованию первичного космического излучения ТУНКА-133 с применением наносекундных источников света, использующих ультраяркие и высокой мощности светоизлучающие диоды, с диапазоном изменения амплитуды светового импульса $0 \div 10^{12}$ фотонов при длительности импульса $3 \div 7$ нс (FWHM).

При исследовании пластиковых оптоволоконных кабелей калибровочных систем экспериментов GERDA и ТУНКА обнаружена полоса повышенного поглощения световых импульсов в диапазоне длин волн 600-650 нм.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. В.К.Lubsandorzhev, R.V.Vasiliev, Y.E.Vyatchin, R.V.Poleshuk, B.A.J.Shaibonov. Photoelectron backscattering in vacuum phototubes // Nucl. Instrum. and Meth. A. 2006. V.567. P.12-16. / physics/0601157.
2. Р.В.Васильев, Е.Э.Вятчин, Б.К.Лубсандоржиев, П.Г.Похил, Б.М.А.Шайбонов, Р.В.Полешук. Многоцелевая экспериментальная глубоководная гирлянда для нейтринных экспериментов на оз. Байкал // ПТЭ. 2008. №2. С.21-25.
3. Р.В.Васильев, О.А.Гресс, Е.Е.Коростелева,, Б.А.М.Шайбонов и др. Измерение формы импульса черенковского излучения широких атмосферных ливней в эксперименте ТУНКА // ПТЭ. 2009. №2. С.17-23.
4. В.К.Lubsandorzhev, R.V.Poleshuk, B.A.M.Shaibonov, Ye.E.Vyatchin LED based powerful nanosecond light sources for calibration systems of deep underwater neutrino telescopes // Nucl. Instrum. and Meth. A. 2009. V. 602. P.220-223.
5. M.Knapp, P.Grabmayr, J.Jochum et al. The GERDA muon veto Cherenkov detector // Nuclear Instruments and Methods A. 2009. V. 610. P.280.
6. F.Ritter, B.Lubsandorzhev, K.Freund, P.Grabmayr, J.Jochum, M.Knapp, B.Shaibonov. The calibration system of the GERDA muon veto Cherenkov detector // Nucl. Instrum. and Meth. A. 2010. V.617. P.420.
7. Н.М.Буднев, Р.Вишневецки, О.А.Гресс,, Б.А.М.Шайбонов и др. ТУНКА-133: Статус 2008 года и развитие методики анализа данных // Известия РАН. Серия физическая. 2009. Т.73. N.5. С.627-641.
8. N.M.Budnev, Chvalaiev O.A., O.A.Gress,, B.A.Shaibonov (ju) et al., The Cosmic Ray Mass Composition in the Energy Range 10^{15} - 10^{18} eV measured with the Tunka Array: Results and Perspectives // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 2009. Vol.190. P.247-252.
9. N.M.Budnev, O.V.Chvalaev, O.A.Gress,, B.A.Shaibonov (ju) et al. Tunka-133 EAS Cherenkov Array: Status of 2007 // Proc. of the 30th ICRC,

- R.Caballero, J.C.D'Olivo, G.Medina-Tanco, L.Nellen, F.A.Sanchez, J.F.Valdes-Galicia (eds.) Universidad nacional Autonoma de Mexico, Mexico City, Mexico, 2008. Merida Mexico, July 2007. Vol.5(He part 2). P.973. / arXiv:0804.0856 [astro-ph].
10. B.K.Lubsandorzhev, R.V.Poleshuk, B.A.J.Shaibonov, Y.E.Vyatchin, A.Zablotsky. A LED Flasher for TUNKA EAS Experiment // Proc. of the 30th ICRC, R.Caballero, J.C.D'Olivo, G.Medina-Tanco, L.Nellen, F.A.Sanchez, J.F.Valdes-Galicia (eds.) Universidad nacional Autonoma de Mexico, Mexico City, Mexico, 2008. Merida Mexico, July 2007. Vol.5(He part 2). P.1117. / arXiv:0709.0458 [physics].
11. B.K.Lubsandorzhev, R.V.Poleshuk, B.A.J.Shaibonov, Y.E.Vyatchin. Powerful nanosecond light sources based on LEDs for astroparticle physics experiments // Proc. of the 30th ICRC, R.Caballero, J.C.D'Olivo, G.Medina-Tanco, L.Nellen, F.A.Sanchez, J.F.Valdes-Galicia (eds.) Universidad nacional Autonoma de Mexico, Mexico City, Mexico, 2008. Merida Mexico, July 2007. Vol.5(He part 2). P.1581. / arXiv:0709.0453 [physics].
12. A.V.Zablotsky, N.V.Budnev, O.A.Chvalaev,, B.A.J.Shaibonov et al. Data acquisition system of the TUNKA-133 array // Proc. of 10th ICATTP, Villa Olmo, Como, Italy, 8-12 October 2007, ed. by M.Barone, A.Gaddi, C.Leroy, L.Price, P.G.Rancoita, R.Ruchti, World Scientific, 2008, pp.287-291. arXiv:0804.0856.
13. Budnev N.M., Besson D., Chvalaiev O.A., B.A.J.Shaibonov et al. The Tunka-133 EAS Cherenkov array – status, first results and plans // Proc. of the 31st ICRC, Lodz Poland July 2009. arXiv:1003.0089 [astro-ph].
14. Budnev N.M., Chvalaiev O.A., O.A.Gress,, Shaibonov B.Lubsandorzhev B.K. et al., Cosmic ray mass composition by the data of TUNKA Cherenkov array // Proc. of the 21st ECRS. 9-12 September 2008, Kosice Slovakia. Institute of Experimental Physics Slovak Academy of Science. 2009. P.427-431.
15. Б.К.Лубсандоржиев, Е.Э.Вятчин, Б.А.Шайбонов. Ультраяркие синие и УФ светодиоды в космомикрoфизических экспериментах // Труды 7-й Всероссийской конференции “Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы”. 1-3 февраля 2010. МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет. Издательство: Физико-технический институт им. Иоффе. Санкт-Петербург 2010. С.226.