

На правах рукописи

Ушаков Никита Андреевич

Разработка и создание полутонного прототипа
Баксанского большого нейтринного телескопа

01.04.01—Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

Научный руководитель:

Лубсандоржиев Баярто Константинович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, отдел экспериментальной физики, ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Рыкалин Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Руководитель сектора сцинтилляционных и фотоэлектронных приборов, главный научный сотрудник;

Клименко Александр Адольфович, кандидат физико-математических наук, Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных проблем им. В. П. Дзелепова, старший научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Защита состоится _____ в _____ часов на заседании диссертационного совета Д002.119.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИЯИ РАН по адресу:

<http://www.inr.ru/rus/referat/dis-zasch.html>.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета Д002.119.01,
кандидат физ.-мат. наук

Демидов Сергей Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности темы. Баксанский Большой Нейтринный Телескоп (ББНТ) — это проектируемый жидкостный сцинтилляционный нейтринный телескоп с массой мишени 10 кт, который планируется создать в Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований Российской академии наук (БНО ИЯИ РАН). Этот многоцелевой нейтринный детектор для регистрации потоков нейтрино и антинейтрино от Солнца, Земли и астрофизических источников будет расположен в подземной зоне БНО на глубине около 4700 м.в.э. (метр водного эквивалента). Детектор будет более чем на порядок превышать по рабочему объему самый чувствительный на сегодняшний день нейтринный детектор на основе жидкого органического сцинтиллятора, Vorexino [1], и будет одним из самых больших из всех планирующихся подобных детекторов. Помимо более чем десятикратного увеличения объема, будет значительно снижен затрудняющий идентификацию нейтринных событий фон. Такое снижение фона обуславливается глубиной расположения, пассивной и активной защитой, радиационной чистотой всех элементов детектора и удаленностью Баксанской нейтринной обсерватории от действующих ядерных реакторов. По последнему параметру БНО — одна из лучших подземных лабораторий, в которых планируется разместить крупномасштабные нейтринные телескопы [2]. Таким образом, детектор станет одним из самых чувствительных детекторов и одним из ключевых участников всемирной сети многоцелевых нейтринных детекторов нового поколения, в которую войдут созданные в настоящее время установки KamLAND [3], JinPing [4], JUNO [5], SNO+ [6].

Проект детектора включает четыре этапа. Первый этап (2017–2019 гг.) — создание опытного образца с массой жидкого сцинтиллятора 0.5 т, размещенного в лаборатории галлий-германиевого нейтринного телескопа (ГГНТ) БНО. Второй этап (2019–2022 гг.) — создание опытного образца с массой жидкого сцинтиллятора 5 т, также расположенного в Лаборатории ГГНТ, для отработки применяемых научно-технологических методов и подходов. Третий этап — проектирование и создание масштабного прототипа с массой сцинтиллятора 100 т. На этом этапе, помимо разработки методов и технологий полномасштабного детектора, прототип сможет решать актуальные научные задачи, например, отслеживать взрывы сверхновых с коллапсирующим ядром в Галактике. Одна из основных задач 100-тонного детектора может быть связана с экспериментами по поиску стерильных нейтрино с искусственными источниками нейтрино. Наконец, четвертый этап — это проектирование, создание и запуск полномасштабного детектора, способного решить весь комплекс задач, поставленных в проекте.

Среди основных научных задач полномасштабного сцинтилляционного нейтринного детектора нового поколения можно привести следующие:

- Измерение потоков антинейтрино от бета-распадов изотопов естественных радиоактивных семейств ^{238}U и ^{232}Th , а также ^{40}K , содержащихся в земных недрах (геонейтрино). Надежная регистрация таких потоков позволит установить вклад энерговыделения от радиоактивного распада указанных изотопов в общий тепловой поток Земли; определить соотношение Th/U внутри планеты, что позволит дать ответ на ряд актуальных вопросов о внутреннем устройстве, происхождении и эволюции нашей планеты;
- Регистрация нейтрино от Солнца, образующихся в результате так называемого CNO-цикла. Измерение потока этих нейтрино позволит определить с высокой точностью химический состав солнечных недр, что является особенно актуальным в контексте современных трудностей согласования наблюдений химического состава фотосферы с данными гелиосейсмологии («проблема металличности»);
- Регистрация изотропного потока нейтрино, накопившихся во Вселенной в результате гравитационных коллапсов ядер массивных звезд и образования нейтронных звезд и черных дыр.
- Изучение динамики взрыва сверхновой путем регистрации интенсивности и спектра нейтринной вспышки.
- Регистрация совокупного потока антинейтрино от всех имеющихся на Земле ядерных реакторов.

Целью данной работы является разработка и создание полутонного прототипа проекта Баксанского большого нейтринного телескопа.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать проект полутонного прототипа ББНТ;
2. Разработать и создать жидкий органический сцинтиллятор для прототипа;
3. Разработать и создать методы и средства отбора, тестирования и исследования параметров фотодетекторов для прототипа;
4. Разработать и создать электронную систему регистрации событий прототипа;
5. Разработать и создать программное обеспечение для системы регистрации событий прототипа;
6. Осуществить монтаж и сборку прототипа;
7. Произвести физический пуск и эксплуатацию прототипа.

Научная новизна и практическая значимость: Осуществление проекта Баксанского большого нейтринного телескопа в силу выгодного месторасположения телескопа позволит получить многозадачный нейтринный детектор на новом уровне чувствительности. Полутонный прототип является первым этапом работ по этому проекту. Создание полутонного

прототипа позволяет решить задачи по выбору фотодетекторов, жидкого сцинтиллятора, активных и пассивных вето детекторов, достижения низкого уровня внутренней радиоактивности материалов детектора и т.д., позволит выбрать пути дальнейшего развития проекта ББНТ. В диссертационной работе показано, что разработанный и созданный полутонный прототип в дальнейшем может быть удобной платформой для развития технологий создания сверхчистых высокоэффективных жидких органических сцинтилляторов, например, с пониженным содержанием радиоактивного изотопа ^{14}C , фотодетекторов с ультранизким уровнем внутренней радиоактивности, а также позволит тестировать фотодетекторы отечественного производства, тем самым способствуя возрождению разработок и производства фотодетекторов в России, родине вакуумных и твердотельных фотоумножителей.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработка и создание полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа;
2. Разработка и создание электронной системы регистрации событий полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа;
3. Разработка и создание программного обеспечения для контроля, управления и сбора данных прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа;
4. Разработка и создание методов и средств отбора, тестирования и исследования параметров фотоэлектронных умножителей полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа;
5. Исследование детекторных элементов полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа.

Достоверность полученных результатов подтверждается успешной эксплуатацией прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа в БНО ИЯИ РАН, а также активным использованием результатов работы в проектировании следующих этапов проекта Баксанского большого нейтринного телескопа. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

1. 35 Международная конференция ELBRUS 2020, Эльбрус, Кабардино-Балкария, Россия, 1–6 марта 2020 г.;
2. 27 Международная конференция Ломоносов 2020, Москва, Россия, 10–27 ноября 2020 г.;
3. 28 Международная конференция Ломоносов 2021, Москва, Россия, 11–23 апреля 2021 г.;
4. 37 Международная конференция ICRC 2021, Берлин, Германия, 12–23 июля 2021 г.;

5. 64 Всероссийская конференция МФТИ, Москва, Россия, 29 ноября–3 декабря 2021 г.

Личный вклад. Автор принимал активное участие в разработке полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа. Автору принадлежит ключевая роль в разработке системы регистрации детектора. Автором лично выполнен монтаж и настройка системы регистрации детектора, разработан и создан измерительный стенд для исследования параметров фотоумножителей и выполнены все измерения параметров, результаты которых представлены в диссертации. Автором лично выполнена разработка всего программного обеспечения системы регистрации. При непосредственном участии автора проведены работы по разработке и созданию жидкого органического сцинтиллятора прототипа и измерены его характеристики. Автору принадлежит ключевая роль в монтаже детектора. Автором лично рассчитан поток реакторных нейтрино в точке расположения детектора, выполнена калибровка фотоэлектронных умножителей по усилению, выполнена калибровка детектора радиоактивными источниками, измерены скорости счёта установки и измерен поток мюонов с помощью прототипа детектора.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 9 работах, индексируемых в международных базах данных Web of Science, SCOPUS, рекомендованных ВАК:

1. Yu.M. Malyshkin, A.N. Fazliakhmetov, A.M. Gangapshev, T.V. Ibragimova, M.M. Kochkarov, V.V. Kazalov, D.Yu. Kudrin, V.V. Kuzminov, B.K. Lubsandorzhiev, G.Ya. Novikova, V.B. Petkov, A.Yu. Sidorenkov, N.A. Ushakov, E.P. Veretenkin, D.M. Voronin, E.A. Yanovich. Modeling of MeV-scale particle detector based on organic liquid scintillator // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, 2020. V.951. 162920;
2. Qi Wu, Sen Qian, Lishuang Ma, Jingkai Xia, Bayarto Lubsandorzhiev, Zhigang Wang, Yao Zhu, Haitao Li, Nikita Ushakov, Andrei Sidorenkov, Qianyu Hu, Jianing Sun, Shuguang Si. Study of afterpulses in the 20-inch HQE-MCP-PMT for the JUNO experiment // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, 2021. V.1003. 165351;
3. N.A. Ushakov, A.N. Fazliakhmetov, A.M. Gangapshev, V.N. Gavrin, T.V. Ibragimova, M.M. Kochkarov, V.V. Kazalov, D.Yu. Kudrin, V.V. Kuzminov, B.K. Lubsandorzhiev, A.D. Lukanov, Yu.M. Malyshkin, G.Ya. Novikova, V.B. Petkov, A.A. Shikhin, A.Yu. Sidorenkov, E.P. Veretenkin, D.M. Voronin, E.A. Yanovich. New large-volume detector at the Baksan Neutrino Observatory: Detector prototype // Journal of Physics: Conference Series, V.1787, 012037 (2021);
4. N. Ushakov, A. Fazliakhmetov, A. Gangapshev, V. Gavrin, T. Ibragimova, M. Kochkarov, V. Kazalov, V. Kuzminov, B.

- Lubsandorzhev, A. Lukanov, Yu. Malyshkin, G. Novikova, V. Petkov, A. Shikhin, A. Sidorenkov, O. Smirnov, E. Veretenkin, D. Voronin and E. Yanovich. A new Baksan Large Neutrino Telescope: the project's status // PoS (ICRC2021) 1188;
5. N. Ushakov, A. Fazliakhmetov, T. Ibragimova, V. Gavrin, B. Lubsandorzhev, A. Lukanov, A. Shikhin, A. Sidorenkov and D. Voronin. Evaluation of large area photomultipliers for use in a new Baksan Large Neutrino Telescope project // PoS (ICRC2021) 1101;
 6. D. Voronin, A. Fazliakhmetov, V. Gavrin, T. Ibragimova, B. Lubsandorzhev, A. Lukanov, A. Shikhin, A. Sidorenkov and N. Ushakov. Development of calibration system for a project of a new Baksan Large Neutrino Telescope // PoS (ICRC2021) 1100.
 7. L.B. Bezrukov, A. Virkajarvi, T. Enqvist, J. Joutsenvaaral, V.V. Kazalov, S.D. Krokhaleva, J. Kutuniva, P. Kuusiniemi, K. Loo, B.K. Lubsandorzhev, S.B. Lubsandorzhev, G. Misitano, A.Yu. Sidorenkov, M. Slupecki, W. Trzaska, N.A. Ushakov. New Low-Background Laboratory in the Pyhäsalmi Mine, Finland // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2018. Т.49. N.4. P.769-773;
 8. S. Lubsandorzhev, A. Sidorenkov, B. Lubsandorzhev, S. Ponomarenko, N. Surin, O. Borshev, N. Ushakov, N. Lubsandorzhev. Development of new liquid scintillators for neutrino experiments of next generation // PoS (ICRC2019) 946;
 9. V.B. Petkov, A.N. Fazliakhmetov, A.M. Gangapshev, V.N. Gavrin, T.V. Ibragimova, M.M. Kochkarov, V.V. Kazalov, D.Yu. Kudrin, V.V. Kuzminov, B.K. Lubsandorzhev, Yu.M. Malyshkin, G.Ya. Novikova, A.A. Shikhin, A.Yu. Sidorenkov, N.A. Ushakov, E.P. Veretenkin, D.M. Voronin, E.A. Yanovich. Baksan Large volume scintillation telescope: a current status // Journal of Physics: Conference Series. V.1468, 012244 (2020).

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность разработки и создания полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа, формулируются цели и задачи исследований, проведенных в ходе выполнения диссертационной работы, а также показаны её практическая значимость и новизна работы.

Первая глава посвящена источникам нейтрино низких энергий, на регистрацию которых направлен Баксанский большой нейтринный телескоп, а именно солнечным нейтрино, геонейтрино, реакторным нейтрино и нейтрино от сверхновых звёзд. Описаны методы регистрации данных типов нейтрино и детекторы, использующие эти методы. Описаны и приведены основные результаты радиохимических экспериментов SAGE [7] и

GALLEX [8], черенковского водного эксперимента Super-Kamiokande [9] и эксперимента с тяжёлой водой SNO [10], а основное внимание сосредоточено на жидко-сцинтилляционных экспериментах Borexino [1], KamLAND [3], SNO+ [6] и JUNO [5].

Вторая глава посвящена конструкции полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа и физическим условиям в месте его расположения. Также произведено моделирование отклика детектора и приведены результаты измерения радиоактивного фона от элементов конструкции детектора.

Прототип детектора располагается в основном экспериментальном зале Лаборатории галлий-германиевого нейтринного телескопа (ЛГГНТ) БНО ИЯИ РАН, находящейся в Баксанском ущелье, Россия. Подземный комплекс ЛГГНТ находится в толще горы Андырчи на расстоянии 3.5 км от входа в штольню. Интегральная глубина, на которой располагается детектор, с учётом топографии местности составляет 4550 м.в.э [11]. Поток мюонов космических лучей по сравнению с потоком на поверхности ослаблен в $\sim 10^7$ раз. Для снижения фона быстрых нейтронов и гамма-фона от окружающих пород зал облицован специальным низкорadioактивным бетоном, который уменьшает радиоактивный фон в 15–16 раз (в диапазоне 0.2–3.2 МэВ) [12], а поток быстрых нейтронов в 3 раза (не более $2.3 \times 10^{-7} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ в диапазоне энергий 1–11 МэВ [13]).

Также для Лаборатории ГГНТ был рассчитан фон реакторных антинейтрино. Согласно расчётам, для ЛГГНТ поток реакторных антинейтрино ото всех функционирующих в мире АЭС (176 шт.), при условии их 100% загрузки, с учётом осцилляций составил $1.075 \times 10^6 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ или 53.9 TNU, а в диапазоне геонейтрино (до 3.2 МэВ) поток составляет $1.061 \times 10^6 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ или 17.3 TNU. На рисунке 1а изображён энергетический спектр реакторных антинейтрино для ЛГГНТ, а на рисунке 1б изображён ожидаемый спектр сигнала от данных антинейтрино.

Прототип включает в себя две зоны: центральная зона, служащая мишенью для нейтрино, заполнена жидким органическим сцинтиллятором и окружена второй зоной, заполненной водой, которая служит защитой от внешней радиоактивности.

С помощью инструмента LSMC (Liquid Scintillator Monte Carlo), разработанного на основе набора инструментов Geant4 [14; 15], было проведено моделирование энергетического отклика детектора для различных конфигураций формы сцинтилляционной мишени и расположения ФЭУ, а именно для сферической мишени со сферическим расположением ФЭУ, цилиндрической мишени с цилиндрическим расположением ФЭУ и смешанной конфигурации со сферической мишенью и цилиндрическим расположением ФЭУ. Согласно результатам моделирования, конфигурация со сферической мишенью и сферическим расположением ФЭУ была выбрана как наиболее оптимальная.

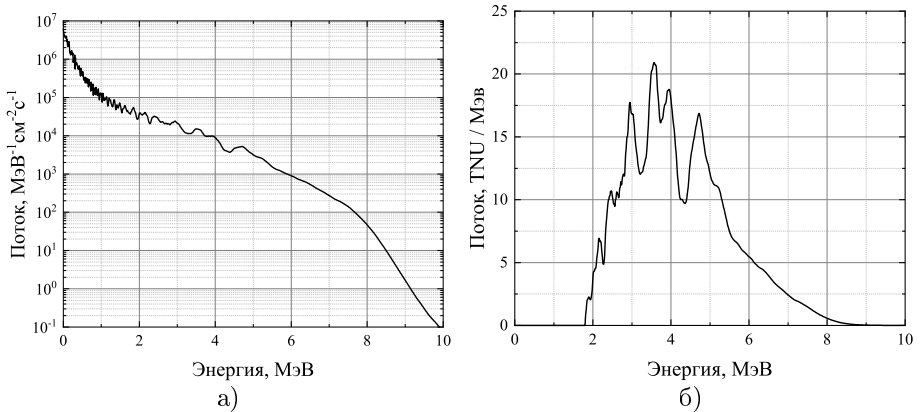


Рис. 1 — (а) Расчётный энергетический спектр реакторных антинейтрино и (б) ожидаемый спектр сигнала от них для ЛГГНТ.

Таким образом, сцинтиллятор находится внутри сферы с внутренним радиусом 48 см и толщиной стенки 1.5 ± 0.5 см. Сфера изготовлена из полиметилметакрилата, материала с показателем преломления $n = 1.5$ на длине волны 420 нм, что соответствует показателю преломления используемого сцинтиллятора [16; 17]. Сфера помещена в заполненный водой цилиндрический бак из сополимерного полипропилена со стальным каркасом. Диаметр и высота резервуара составляют 240 и 280 см соответственно, объём 11.5 м^3 . Исходя из радиуса акриловой сферы, толщина водной защиты составляет не менее 70 см. Сцинтилляционная мишень просматривается двадцатью 10-дюймовыми ФЭУ Hamamatsu R7081-100 WA-S70. ФЭУ размещены в четыре уровня по пять штук в шахматном порядке в вершинах правильного пятиугольника. Расстояние от центра сферы до ФЭУ составляет примерно 75 см. Акриловая сфера и ФЭУ устанавливаются на каркас из нержавеющей стали марки AISI 316 подтипа L, который отличается меньшим содержанием углерода. Каркас выполнен в виде десятиугольной призмы с высотой 222.5 см и диаметром описанной окружности 220 см. ФЭУ крепятся к каркасу с помощью шарнирных креплений со стальными штангами и колодками из пластика ZEDEX 100k. Крепления позволяют регулировать расстояние ФЭУ до сферы и их направление по горизонтали и вертикали. Снизу и сверху на каркас крепятся регулируемые по длине опоры из нержавеющей стали, на которые устанавливается акриловая сфера, при этом опоры сверху препятствуют всплытию сферы. На рисунке 2 изображена 3D-модель прототипа детектора. На рисунке 3 изображён каркас с установленными на него акриловой сферой и ФЭУ, полиэтиленовый контейнер, из которого производится заливка сцинтиллятора в сферу, и полипропиленовый водный резервуар.

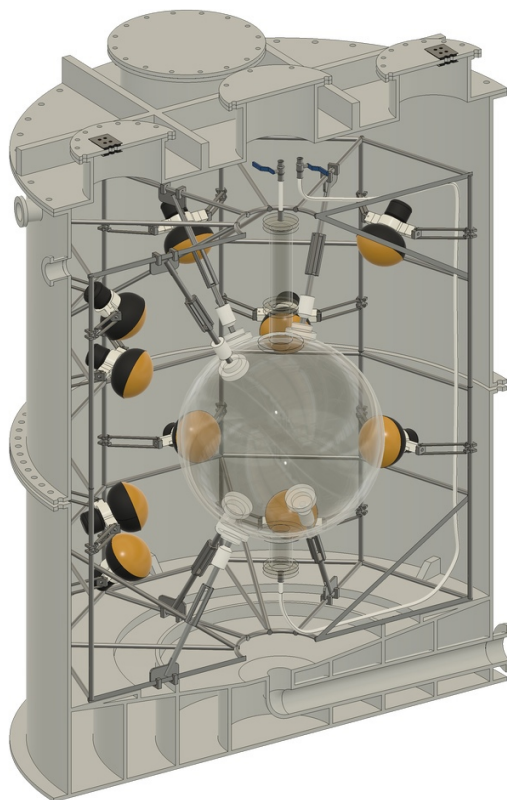


Рис. 2 — 3D-модель плутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа.

Вода в водный резервуар поступает через систему очистки и хранения воды, которая включает в себя осветление, обезжелезивание, дехлорирование, умягчение, обеззараживание, аэрацию, а также очистку воды набором механических фильтров и фильтров с ионообменными смолами. Чистота воды контролируется датчиком электропроводности.

Одним из ключевых факторов, влияющих на чувствительность сцинтилляционных детекторов, направленных на регистрацию нейтрино низких энергий, является радиоактивный фон элементов конструкции детектора. В связи с этим для используемых в детекторе оргстекла, стали, ФЭУ и пластика ZEDEX 100k был исследован радиоактивный фон. Измерения проводились в Низкофоновой лаборатории глубокого заложения БНО ИЯИ РАН [18] с помощью германиевого полупроводникового детектора с пассивной защитой. Согласно полученным данным, все исследуемые материалы обладают относительно низким радиоактивным фоном.

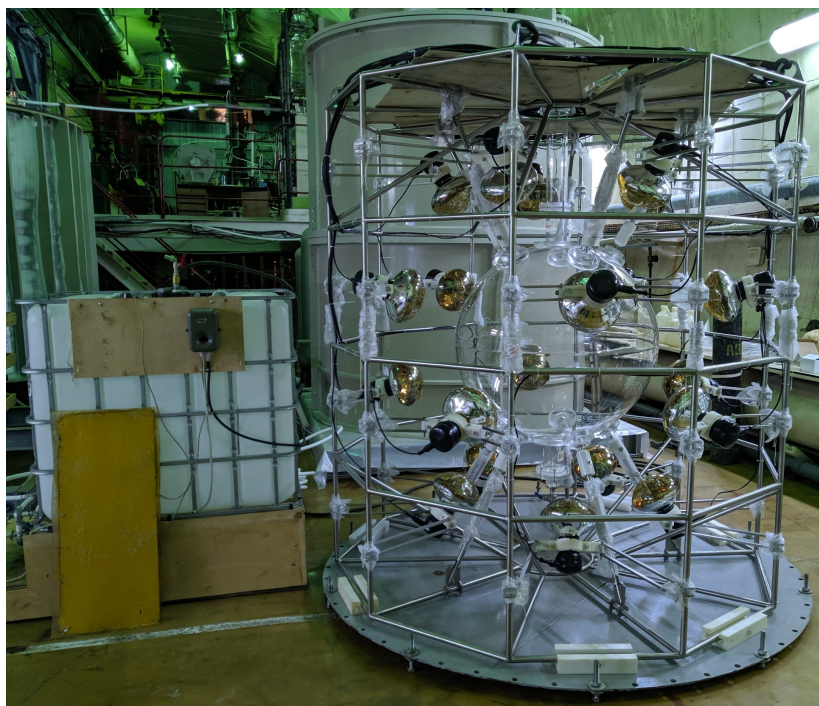


Рис. 3 — Каркас с установленными ФЭУ и акриловой сферой; слева контейнер из полиэтилена высокой плотности с приготовленным для заливки жидким сцинтиллятором; на заднем плане полипропиленовый водный резервуар.

В третьей главе представлены результаты разработки жидкого органического сцинтиллятора для полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа. В качестве растворителя был выбран линейный алкилбензол (LAB), который отличается высокой, относительно других растворителей, температурой вспышки, около $140\text{ }^{\circ}\text{C}$, низкой токсичностью и безвредностью для окружающей среды. Он легко доступен и довольно дешёв, поскольку является составной частью стандартного процесса производства моющих средств в химической промышленности. Кроме того, он химически совместим с акрилом, что делает его пригодным для жидкосцинтилляционных детекторов. В прототипе был использован LAB российской компании КИНЕФ.

Для полутонного прототипа ББНТ в качестве первичной сцинтилляционной добавки был выбран РРО (2,5-дифенилоксазол). Для согласования спектра излучения сцинтиллятора со спектром пропускания оргстекла, используемого при изготовлении сферы мишени,

была добавлена спектросмещающая сцинтилляционная добавка bis-MSB (1,4-Бис(2-метилстирил)бензол). На рисунке 4 изображены спектр излучения PPO, растворённого в LAB с концентрацией 2 г/л, спектр излучения bis-MSB, растворённого в толуоле с концентрацией 20 мг/л и спектр пропускания оргстекла сферы.

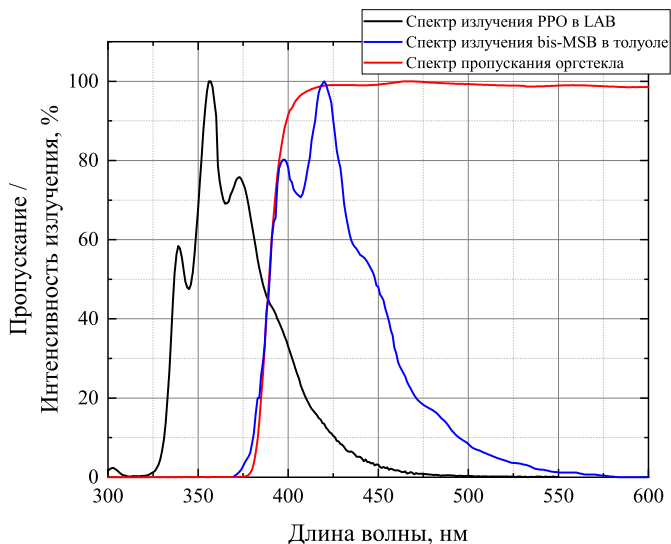


Рис. 4 — Спектры излучения сцинтилляционных добавок PPO (чёрная линия) и bis-MSB (синяя линия), а также спектр пропускания используемого оргстекла (красная линия).

Для определения необходимой концентрации PPO и bis-MSB были проведены измерения основных характеристик сцинтиллятора, световыхода и кинетики свечения (для PPO), при концентрации PPO от 0 до 10 г/л и концентрации bis-MSB от 2 до 20 мг/л. Для измерения указанных характеристик сцинтиллятор, залитый в кварцевую кювету, облучался гамма-квантами 662 кэВ от радиоактивного источника ^{137}Cs , а затем сцинтилляционные световые вспышки регистрировались с помощью ФЭУ. Измерения кинетики свечения сцинтиллятора проводились методом счета коррелированных во времени фотонов [19]. Согласно полученным результатам, и исходя из экономических соображений, для полутонного прототипа ББНТ была выбрана концентрация PPO 2 г/л. При этом световыход сцинтиллятора составляет примерно 85% от максимального, абсолютный световыход около 8 000 фотон/МэВ, а время высвечивания около 6 нс. Для bis-MSB была выбрана концентрация 10 мг/л. Контроль состояния

сцинтиллятора в полутонном прототипе ББНТ показал уменьшение световых выходов лишь на 4% за 2 года.

Далее в данной главе описаны методики анализа химического состава сцинтиллятора и очистки его от различных примесей. Согласно проведённому хромато-масс-спектрометрическому анализу различных партий LAB производства КИНЕФ, концентрации атомов водорода, углерода и общее число электронов составляют $N_H = 6.26 \times 10^{28}$ атомов/м³, $N_C = 3.77 \times 10^{28}$ атомов/м³, $N_e = 2.89 \times 10^{29}$ частиц/м³ [20]. При UV/VIS-спектроскопии были выявлены характерные для 9-метилантрацена полосы поглощения с максимумами на 350, 368 и 389 нм. Анализ содержания радиоактивных примесей осуществлялся сцинтилляционным способом с заранее введённым в раствор с LAB определённым количеством урана и тория в виде комплексов с триоктилфосфиноксидом.

Были произведены исследования по очистке LAB от 9-метилантрацена, U и Th (очистка от калия не проводилась в связи с незначительным его содержанием в LAB) с помощью сорбции на оксиде алюминия Al₂O₃. Исследования показали, что при соотношении сорбента к LAB 1:2 пики поглощения от 9-метилантрацена почти полностью исчезают. Уран и торий полностью сорбируются уже при соотношении сорбента к LAB 1:10. По результатам проведённых исследований была выработана методика очистки жидкого сцинтиллятора на основе LAB.

Сцинтилляционные добавки содержат в своём составе большое количество калия (около 2×10^{-10} г/г для ⁴⁰K). Из-за невозможности очистки готового сцинтиллятора методом сорбции через Al₂O₃ из-за абсорбирования оксидом алюминия сцинтилляционных добавок [21], очистка от калия проводилась методом водной экстракции. Анализ содержания калия осуществлялся в водной фазе методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой. С помощью выработанной методики РРО почти полностью очищается от калия [22]. Ввиду малой концентрации bis-MSB в сцинтилляторе, его очистка от калия для полутонного прототипа детектора не производилась.

Наконец, в данной главе описана проблема содержания в органических сцинтилляторах радиоактивного изотопа углерода ¹⁴C, который является одним из основных факторов, препятствующих регистрации низкоэнергичных событий с энергией ниже 300 кэВ. На основании анализа соотношения ¹⁴C/¹²C существует возможность достичь концентрации ¹⁴C ниже 10⁻¹⁸ г/г путем тщательного выбора нефтяного месторождения [23]. В связи с этим, для исследования концентрации ¹⁴C в жидких сцинтилляторах ниже 10⁻¹⁵ разрабатывается специальная экспериментальная установка [24], расположенная в Низкофоновой лаборатории БНО ИЯИ РАН [18].

В **четвёртой главе** приведено описание системы регистрации прототипа детектора, структурная схема которой изображена на рисунке 5.

Описаны методы и результаты измерения основных характеристик фотодетекторов, рассмотрена регистрирующая электроника, а также описано разработанное программное обеспечение.

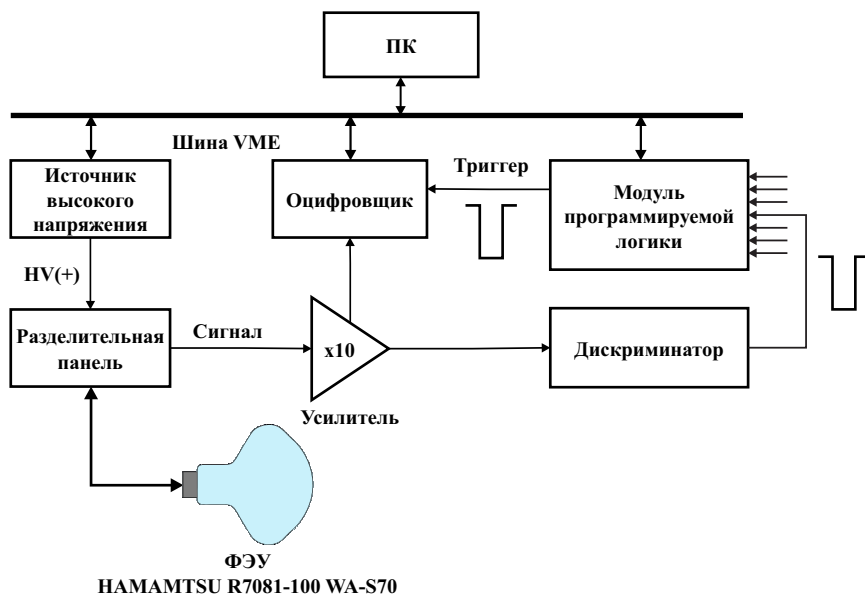


Рис. 5 — Структурная схема системы регистрации детектора.

В качестве фотодетекторов в детекторе используются 10-ти дюймовые фотоэлектронные умножители Hamamatsu R7081-100 WA-S70. Минимальный эффективный диаметр фотокатода R7081-100 составляет 22 см. Фотокатод выполнен из бищелочного материала Sb-K-Cs. Катодная камера выполнена из боросиликатного стекла. Данные ФЭУ имеют линейно-коробчатую динодную систему, состоящую из 10 динодов. Помимо этого, R7081-100 имеют три фокусирующих электрода. Делитель напряжения, полное сопротивление которого составляет 12.7 МОм, расположен в водонепроницаемом корпусе. Сигнал и напряжение питания ФЭУ передаются по одному 70-метровому коаксиальному кабелю.

Для измерения характеристик ФЭУ была исследована партия из 25 штук. Для каждого ФЭУ были измерены однофотозлектронный отклик, временные характеристики, скорости счёта импульсов темного тока и послеимпульсы. Квантовая эффективность, зонная характеристика и линейность ФЭУ практически не меняются в рамках одной модели, особенно в рамках одной партии, в связи с чем были измерены лишь для нескольких образцов.

Измерения квантовой эффективности заключались в измерении анодного тока при облучении фотокатода ФЭУ монохроматическим светом в некотором диапазоне длин волн. ФЭУ при этом работает в диодном режиме (все диоды, фокусирующие электроды и анод закорочены). Излучение в широком диапазоне длин волн (185–2000 нм) от мощного источника света, в качестве которого использовался осветитель Hamamatsu E7536 с ксеноновой лампой L14286, подаётся на монохроматор ЛМ-4, который из белого света выделяет свет определённой длины волны, затем подаваемый на фотокатод ФЭУ. Полученные результаты сравниваются с откалиброванным фотодетектором. В качестве эталонного использовался кремниевый фотодиод Hamamatsu S1337-1010BQ.

На рисунке 6 показана зависимость квантовой эффективности ФЭУ R7081-100 WA-S70 от длины волны. Как видно из данного спектра, квантовая эффективность превышает 30% в диапазоне длин волн 330–450 нм, а на 390 нм достигает максимума в почти 40%. Также видно, что спектральная чувствительность фотокатода ФЭУ хорошо согласуется со спектром излучения используемого в прототипе ББНТ сцинтиллятора на основе LAB как при добавлении только первичной сцинтилляционной добавки PPO, так и при добавлении шифтера bis-MSB. При этом квантовая эффективность ФЭУ усреднённая для спектров излучения PPO и bis-MSB составляет 34.4% и 34.3% соответственно.

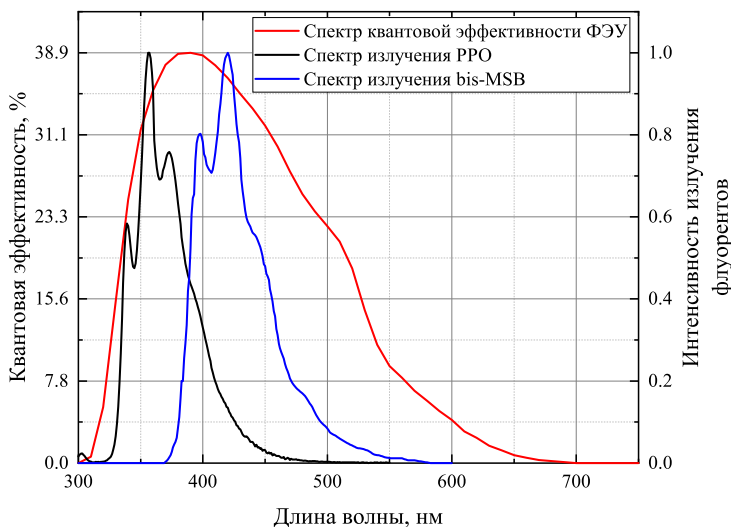


Рис. 6 — Зависимость квантовой эффективности ФЭУ R7081-100 WA-S70 (красная линия) от длины волны и спектры излучения сцинтилляционных добавок PPO (чёрная линия) и bis-MSB (синяя линия).

Для измерения однофотозлектронного отклика ФЭУ, а также других его характеристик, использовалась схема, в которой светодиодный источник света с помощью генератора импульсов синхронизировался с оцифровщиком, считывающим сигнал с ФЭУ. Для данных измерений применялись используемые в системе регистрации прототипа детектора оцифровщик CAEN V1730, разделительная панель, быстродействующий усилитель CAEN N979 и источник высокого напряжения CAEN V6533, а также специально разработанное программное обеспечение. Для более детального рассмотрения формы однофотозлектронного сигнала ФЭУ и для измерения временных характеристик был использован 12-битный оцифровщик CAEN DT5742 с частотой дискретизации 5 ГГц. В качестве источника света использовался быстродействующий светодиодный модуль, разработанный в нашей лаборатории для исследования амплитудных и временных параметров вакуумных и кремниевых фотоумножителей [25]. Основой этого модуля являются ультраяркие светодиоды InGaN/GaN и запускающий их быстродействующий формирователь импульсов [26], построенный на быстром разряде конденсатора через комплементарную пару быстрых транзисторов [27].

Измерения однофотозлектронного отклика проводились при коэффициенте усиления ФЭУ около 10^7 и десятикратном усилением усилителя. В этом случае однофотозлектронный импульс имеет амплитуду около 45 мВ при нагрузке 50 Ом. Типичные измеренные зарядовые однофотозлектронные спектры для R7081-100 WA-S70 изображены на рисунке 7. Среднее отношение пик/долина составляет 3.73 ± 0.56 , а однофотозлектронное разрешение — 0.68 ± 0.06 (FWHM). Также, с помощью засветки фотокатода в различных его точках была получена зависимость отклика ФЭУ R7081-100 WA-S70 от расстояния от центра фотокатода вдоль оси поверхности первого динода и перпендикулярно ему.

Длительность однофотозлектронного импульса составляет примерно 40 нс со временем нарастания около 4 нс. Для определения разброса времени прохождения фотоэлектронов в ФЭУ измерялась задержка между триггером и сигналом. Для регистрации предимпульса, порог дискриминации устанавливался на уровень около 0.1 ф.э. На рисунке 8 показаны типичные распределения времени прохождения фотоэлектронов в исследуемых ФЭУ R7081-100 WA-S70. Джиттер при этом составляет 3.01 ± 0.24 (FWHM), предимпульс опережает основной импульс примерно на 26 нс, а задержанный импульс имеет распределение задержки с пиком примерно на 63.5 нс.

Для измерения линейности отклика ФЭУ было использовано два источника света, аналогичных друг другу и синхронизированных между собой и оцифровщиком. Световые сигналы от светодиодов через оптический разветвитель направлялись на фотокатод ФЭУ. Отклик ФЭУ при одновременном облучении фотокатода двумя светодиодами сравнивался с

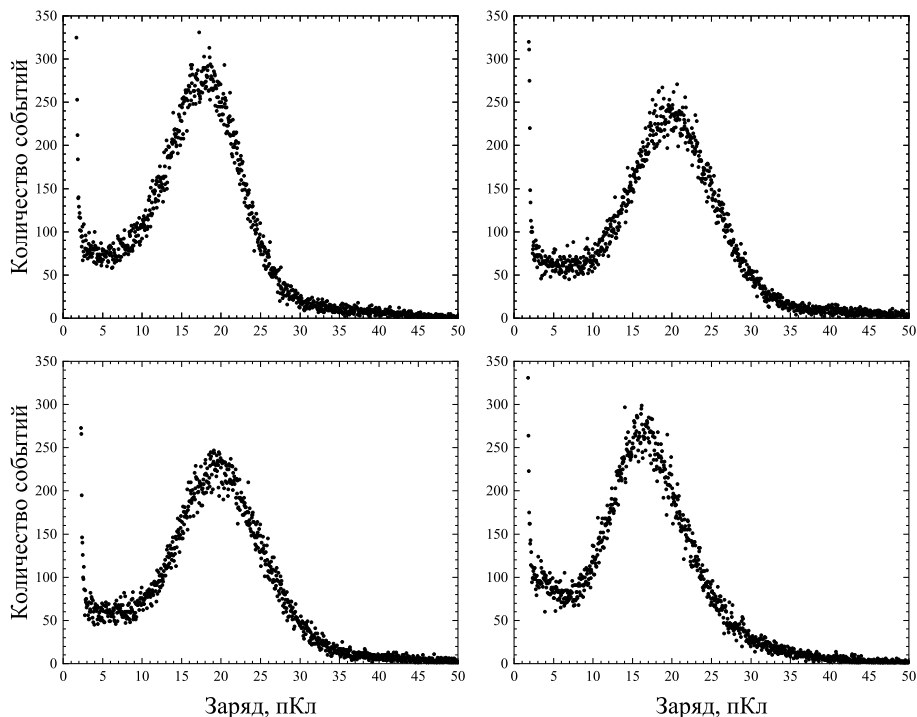


Рис. 7 — Зарядовые спектры однофотонных импульсов ФЭУ R7081-100 WA-S70.

суммой откликов каждого светодиода в отдельности. Согласно результатам измерений, для R7081-100 WA-S70 нелинейность в 5% достигается при интенсивности света примерно 330 ф.э.

Скорости счёта импульсов темнового тока измерялись с помощью модуля программируемой логики CAEN V2495 и разработанной программы CAEN_Scaler. Сигнал с ФЭУ на V2495 подавался через дискриминатор N841 с порогом около 1/4 ф.э. На рисунке 9а показана типичная для исследуемых ФЭУ R7081-100 WA-S70 зависимость скорости счёта импульсов темнового тока от времени после включения рабочего высокого напряжения после засветки фотокатода ФЭУ, при этом постоянная времени составляет не более 6 мин. После же стабилизации уровня темнового тока при условии отсутствия засветки фотокатода при последующем включении ФЭУ уровень скорости счёта импульсов темнового тока практически сразу (несколько секунд) выходит на установившееся значение. Среднее значение установившейся скорости счёта импульсов темнового тока для всей партии ФЭУ составило 1.74 ± 0.87 кГц, что является отличным результатом для

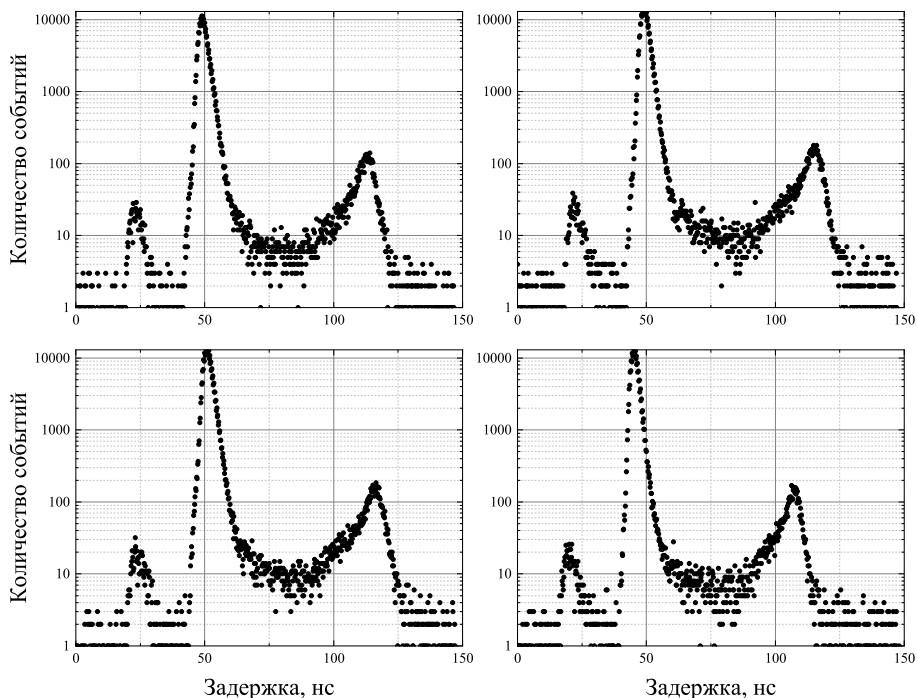


Рис. 8 — Распределения времени пролёта фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода ФЭУ R7081-100 WA-S70.

ФЭУ такого размера. На рисунке 9б показано распределение установившейся скорости счёта импульсов темного тока для одного из образцов.

Для измерения послеимпульсов использовалась разработанная программа CAEN_DGTZ, с помощью которой измерялась задержка между основным импульсом и всеми последующими импульсами, порог для которых устанавливался на уровне $1/4$ ф.э. Измерения проходили при интенсивности засветки порядка нескольких десятков фотоэлектронов. На рисунке 10 изображено типичное для ФЭУ R7081-100 WA-S70 распределение задержек послеимпульсов от основного импульса с учетом подложки от импульсов темного тока. Исходя из полученного распределения, были определены ионы содержащихся в ФЭУ остаточных газов и вероятность возникновения послеимпульса от них. Для каждого отдельного ФЭУ данные значения могут незначительно отличаться в зависимости от концентрации тех или иных остаточных газов и рабочего напряжения ФЭУ.

Помимо классических «длинных» послеимпульсов, были измерены так называемые «сверхдлинные» послеимпульсы [28]. Задержка данного

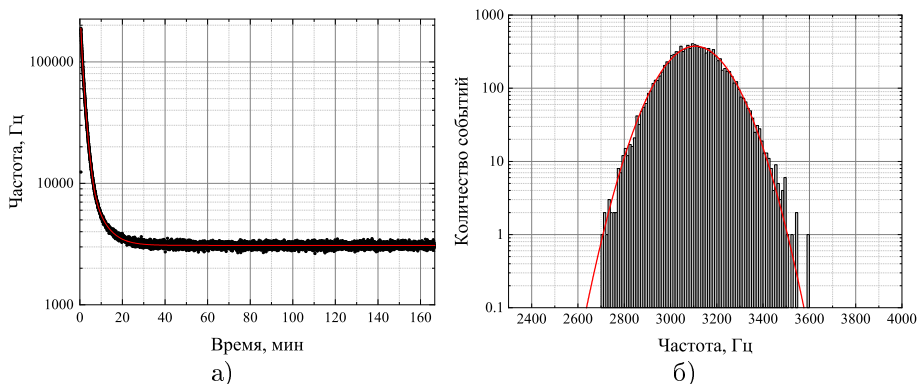


Рис. 9 — (а) Зависимость скорости счёта импульсов темного тока от времени после включения напряжения питания для неустоявшегося в темноте ФЭУ R7081-100 WA-S70 и (б) типичное для данных ФЭУ распределение скорости счёта импульсов темного тока.

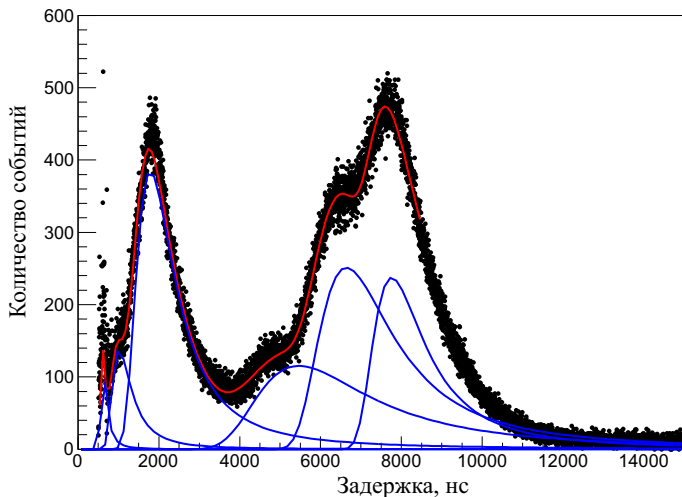


Рис. 10 — Типичное распределение задержек послеимпульсов от основного импульса для ФЭУ R7081-100 WA-S70.

типа послеимпульсов от основного импульса может достигать сотен микросекунд. В связи с этим, исследование таких послеимпульсов является актуальным для нейтринных экспериментов, в которых нейтринные события определяются по коррелированным во времени сцинтилляционным

вспышкам от позитронов и нейтронов, а задержка между ними в зависимости от добавок сцинтиллятора составляет от десятков до нескольких сотен микросекунд. В связи с невысокой вероятностью возникновения «сверхдлинных» послеимпульсов интенсивность засветки фотокатода ФЭУ была увеличена до нескольких сотен фотоэлектронов. На рисунке 11 показано распределение задержки «сверхдлинных» послеимпульсов от основного импульса типичное для всей измеренной партии ФЭУ R7081-100 WA-S70. Распределение задержки от основного импульса находится в диапазоне 50–200 мкс с пиком на 90 ± 3 мкс, вероятность возникновения составляет около 0.01% на фотоэлектрон. На рисунке 12 изображено двумерное распределение «сверхдлинных» послеимпульсов по амплитуде и временной задержке для ФЭУ R7081-100 WA-S70, демонстрирующее однофотоэлектронный характер данного типа послеимпульсов.

Далее в данной главе описывается электроника системы регистрации, которая обеспечивает фотодетекторы напряжением питания, считывает их сигналы, а также с помощью триггерной подсистемы со схемой совпадения осуществляет идентификацию сцинтилляционных событий. Все элементы регистрирующей электроники, кроме модуля разделительной панели, производства компании CAEN.

В модуле разделительной панели сигнал и напряжение питания ФЭУ, которые передаются по одному кабелю, гальванически разделяются. Напряжение питания ФЭУ обеспечивается источниками высокого

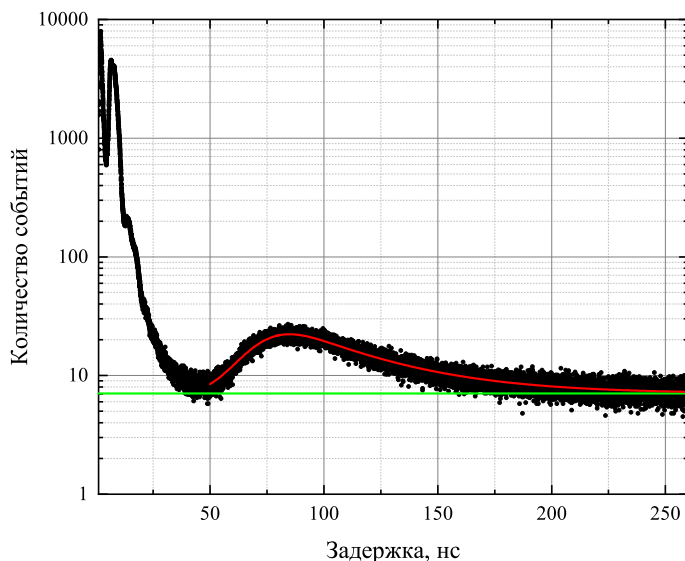


Рис. 11 — Типичное распределение задержек «сверхдлинных» послеимпульсов от основного импульса для ФЭУ R7081-100 WA-S70.

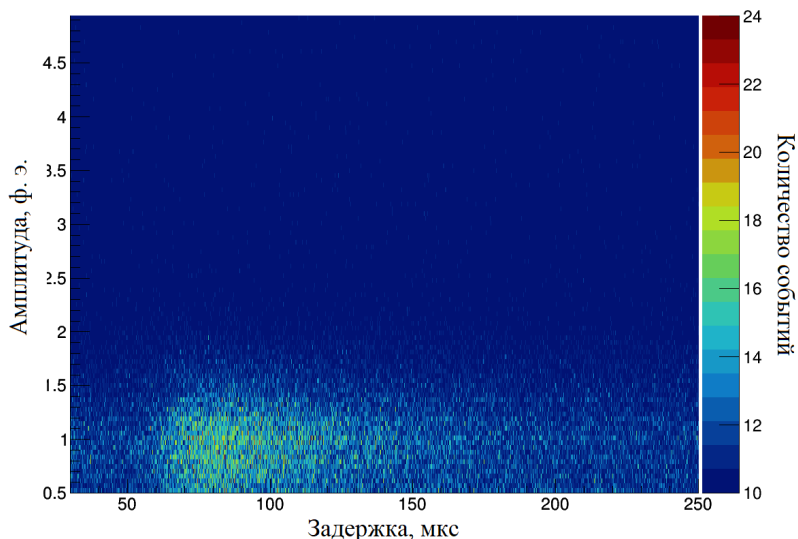


Рис. 12 — Двумерное распределение «сверхдлинных» послеимпульсов по амплитуде и временной задержке для ФЭУ R7081-100 WA-S70.

напряжения (ИВН) V6355. Данный 6-канальный ИВН имеет максимальное выходное напряжение 4 кВ, а максимальный выходной ток 3 мА на канал, что полностью удовлетворяет потребностям ФЭУ.

Сигнал с разделительной панели подаётся на 16-канальный усилитель с быстрым временем нарастания (≤ 1.5 нс) N979 с входной полосой пропускания до 250 МГц и коэффициентом усиления $K = 10$. Данный усилитель имеет по два выхода на каждый вход.

С одного выхода усилителя сигнал подаётся непосредственно на главный элемент регистрирующей электроники, 16-канальный 14-битный оцифровщик V1730 с частотой дискретизации 500 МГц, полосой пропускания 250 МГц и динамическим диапазоном 2 В. Каждый канал оцифровщика имеет SRAM (статическая память с произвольным доступом) буфер размером более 10 мс, который программно можно разделить на 1–1024 кольцевых буфера памяти программируемого размера. Таким образом, V1730 позволяет обойтись без дополнительных линий задержек в системе регистрации, а мёртвое время детектора определяется лишь быстрым действием компьютера.

Со второго выхода усилителя N979 сигнал подаётся на триггерную систему, которая состоит из 16-канального дискриминатора N841 и модуля программируемой логики V2495. С дискриминатора NIM-сигналы всех каналов детектора подаются на модуль программируемой логики V2495.

Данный модуль выполняет функции системы совпадения, позволяющей исключить ложное срабатывание триггера от различных фоновых событий и помех в системе регистрации. Также, данный модуль может работать на антисовпадения, например, при использовании мюонного вето. Вдобавок V2495 способен выполнять функции частотомера для контроля скоростей счёта как отдельно взятых каналов, так и всего детектора по схеме совпадения.

Наконец, в данной главе описаны разработанные для проекта Баксанского большого нейтринного телескопа кроссплатформенные приложения на языке C++ с использованием фреймворка Qt, с помощью которых производится управление работой VME-модулей и крейтов, а также осуществляется чтение, запись и обработка сигналов. Все приложения используют компоненты графического интерфейса QtGui и классы QtWidgets и имеют интуитивно понятный интерфейс. Отображение графики в данных приложениях осуществляется с помощью Qt/C++ виджета QCustomPlot.

Разработанное приложение CAEN_DGTZ предназначено для работы с оцифровщиками CAEN, настройки их параметров, а также для визуализации, обработки и записи считываемых ими сигналов. Поддерживается одновременная работа с несколькими оцифровщиками одного семейства. При работе с оцифровщиком его основные настройки, включая параметры подключения, записываются в бинарный файл, который при последующих подключениях автоматически считывается программой.

Основной функцией CAEN_DGTZ является построение в режиме реального времени для каждого канала осциллограмм считываемых сигналов. По полученным данным, включая суммарный сигнал, производится построение амплитудных и зарядовых гистограмм, а также гистограмм задержек сигналов одних каналов от других или от триггера. Для каждого канала возможна установка временного диапазона, в рамках которого производится расчёт гистограмм, а также реализована программная система совпадения. Для амплитудных и зарядовых гистограмм предусмотрен расчёт базовой линии сигнала с возможностью настройки временного диапазона отдельно для каждого канала. Для исследования послеимпульсов ФЭУ существует возможность измерения временной задержки и амплитуды, а также построения двумерной карты распределения этих параметров, для всех импульсов, следующих за основным импульсом. Как для основного импульса, так и для послеимпульсов независимо устанавливаются амплитудные пороги и временные ворота. Наконец, программа имеет широкий ряд возможностей, связанных с отображением полученных осциллограмм и гистограмм, включая настройку частоты отображения кадров для увеличения скорости работы программы.

Для работы в режиме «offline» предусмотрена возможность записи считываемых осциллограмм на жёсткий диск. Сохранение происходит как

в ручном, так и в автоматическом режиме. Данные сохраняются в бинарном виде, а каждое событие снабжается временной меткой (с точностью до миллисекунды). Существует возможность сохранения числовых данных осциллограмм и гистограмм в виде CSV-таблиц.

Для обработки записанных данных было разработано приложение CAEN_Reader, позволяющее просматривать записанные события. Данная программа имеет набор инструментов по выделению сигнала и построению гистограмм аналогичный CAEN_DGTZ. Также данное приложение позволяет редактировать и пересохранять уже записанные бинарные данные для уменьшения их размера или приведения их к одному виду.

Приложение CAEN_HV предназначено для работы с источниками высокого напряжения CAEN. Функционально приложение можно разделить на две части. Первая отвечает за мониторинг параметров подключённых ИВН и выполнена в отдельном потоке, реализованном с помощью стандартного Qt-класса QThread. Область мониторинга имеет цветовую сигнализацию, сигнализирующую о наличии/отсутствии напряжения в канале, а также о превышении напряжением, током или температурой установленных пределов; при превышении допустимых пределов данных параметров на одном из каналов он автоматически отключается. Вторая область отвечает за установку параметров каналов ИВН. Реализованная в программе система учётных записей позволяет ограничить круг лиц, имеющих доступ к изменению параметров высоковольтной системы. Помимо этого, программа ведёт журнал учёта действий пользователя и возникновения ошибок. Наконец, приложение имеет возможность сохранения и последующей загрузки конфигураций устанавливаемых параметров.

Модуль программируемой логики в рамках системы регистрации прототипа детектора выполняет две задачи: схема совпадения триггерной системы и частотомер для контроля темпов счёта всех каналов. Управление модулем V2495 осуществляется с помощью микропрограмм, написанных на языке VHDL, а интерфейсом между микропрограммой и пользователем служат разработанные приложения CAEN_PLU и CAEN_Scaler.

CAEN_PLU работает совместно с разработанной VHDL-микропрограммой схемы совпадения. CAEN_PLU путём записи 32-битного сообщения в управляющий регистр позволяет пользователю устанавливать логическую схему в зависимости от конкретных задач.

CAEN_Scaler предназначено для работы с V2495 в режиме частотомера. Данное приложение позволяет устанавливать параметры каналов и триггера V2495, отображает частоту сигналов со всех входных портов, а также строит временные графики и гистограммы полученных значений. Данная программа имеет схожий с CAEN_DGTZ набор функций по отображению и записи полученных данных.

Для мониторинга и установки параметров крейтов CAEN, в частности используемых в системе регистрации VME-крейта V8100 и NIM-крейта

N8301, было разработано приложение CAEN_CRATE. В данной программе, помимо возможности контроля и установки основных параметров крейтов по локальной сети Ethernet, реализованы журнал работы программы и возможность сохранения и последующей загрузки конфигурационных файлов. Для ускорения работы программы взаимодействие с каждым крейтом осуществляется в отдельном потоке.

В **пятой главе** описаны настройка, запуск и эксплуатация полнотонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа. После сборки детектора и подключения системы регистрации, в первую очередь, с помощью контроля скорости счёта импульсов отдельно взятых ФЭУ при изменении освещения вокруг детектора была произведена проверка светоизоляции внутреннего пространства водного бака. Данная проверка позволила выявить и затем устранить ряд недостатков в конструкции водного резервуара, связанных со светоизоляцией детектора.

Путём измерения однофотоэлектронного отклика всех ФЭУ одновременно была произведена калибровка ФЭУ на одинаковое усиление. Для калибровки использовался специальный диффузно-рассеивающий шар [29], который через оптический кабель соединялся с упомянутым светодиодным модулем, а затем помещался в геометрический центр акриловой сферы. Высокое напряжение на каждом ФЭУ подбиралось таким образом, чтобы положение однофотоэлектронных пиков всех каналов как можно точнее соответствовало усилению 10^7 . На рисунке 13 изображены зарядовые спектры однофотоэлектронных импульсов всех ФЭУ детектора.

После калибровки ФЭУ была осуществлена заливка сцинтиллятора в акриловую сферу, а затем выполнен запуск детектора и настройка триггерной системы. На рисунке 14 изображён пример полученного прототипом детектора события при срабатывании триггерного сигнала.

Следующим шагом стало измерение скорости счёта детектора. Измерения проводились до заливки воды в резервуар и после. Для данных измерений использовались модуль программируемой логики V2495 и программа CAEN_Scaler, с помощью которой проводился набор гистограммы частоты срабатывания триггерного сигнала. В отсутствие водной защиты частота регистрируемых событий находилась в диапазоне 2550–2650 Гц. Данный разброс объясняется колебаниями концентрации радона, которая составляет около 2.6 пКи/л, в окружающем детектор воздухе. После заполнения резервуара водой, частота регистрируемых событий снизилась до 1110 Гц. Однако затем наблюдалось уменьшение скорости счёта по экспоненциальному закону с постоянной времени, которая соответствует периоду полураспада 3.8 суток, что является периодом полураспада радона ^{222}Rn . Таким образом, система очистки и хранения воды нуждается в модернизации для очистки воды от ^{222}Rn . Содержащийся в воде ^{222}Rn почти полностью распадается примерно через месяц после заливки воды в водный резервуар. Установившееся значение скорости счёта триггерных

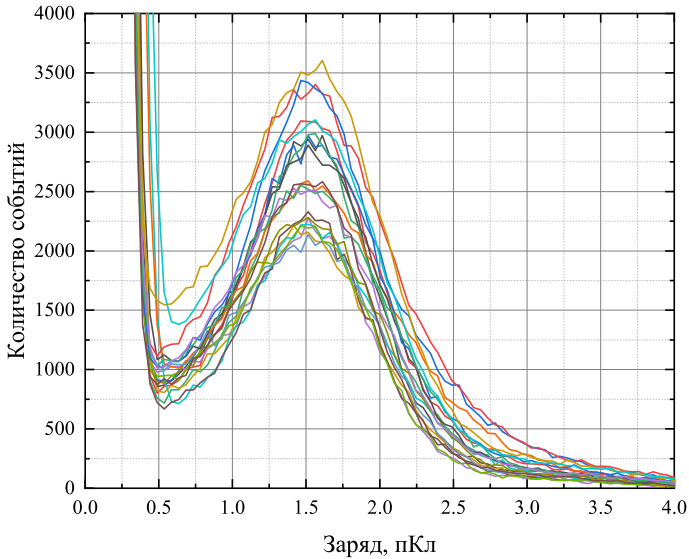


Рис. 13 — Зарядовые спектры однофотоэлектронных импульсов всех ФЭУ детектора.

событий детектора имеет стабильный уровень 60.5 Гц, что демонстрирует высокую эффективность водной защиты.

Для определения энергии регистрируемых детектором частиц была произведена калибровка энергетического отклика детектора. Калибровка детектора производилась путём набора зарядовых спектров импульсов при облучении сцинтиляционной мишени радиоактивными источниками ^{109}Cd , ^{22}Na , ^{133}Ba , ^{137}Cs и ^{60}Co . Исходя из полученных результатов, энергетический отклик детектора составляет примерно 172.6 ф.э. на МэВ.

Наконец, в данной главе описана процедура измерения потока мюонов в Лаборатории ГГНТ с помощью созданного полутонного прототипа. Для регистрации мюонных событий триггерные условия были настроены таким образом, чтобы триггерный сигнал вырабатывался только при преодолении сигналами всех каналов максимально возможного порога дискриминаторов во временном окне 40 нс. Время экспозиции составило 2 724.25 ч, всего было зарегистрировано более 35 000 событий. На рисунке 15 изображён энергетический спектр зарегистрированных событий. Как видно из полученного спектра, наблюдается пик, обусловленный мюонами. Согласно результатам обработки данного спектра, измеренный поток составил $(4.02 \pm 0.24) \times 10^{-9} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, что согласуется с предыдущими измерениями [11].

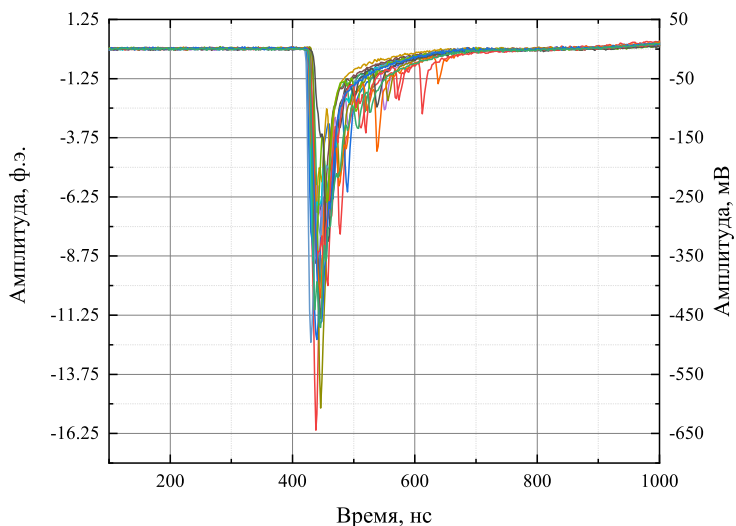


Рис. 14 — Пример события детектора при срабатывании триггерного сигнала.

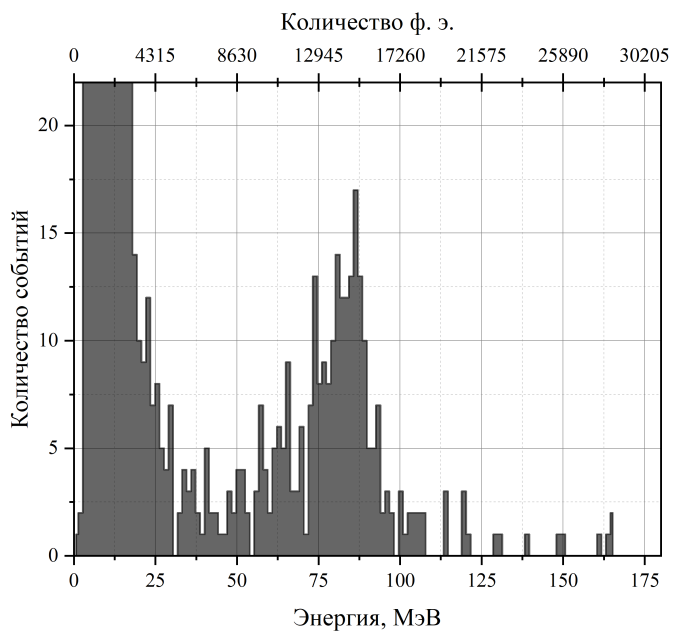


Рис. 15 — Энергетический спектр зарегистрированных событий.

В заключении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Разработан и создан полутонный прототип проекта Баксанского большого нейтринного телескопа. Основой прототипа является 500 литров жидкого сцинтиллятора на базе линейного алкилбензола в акриловой сфере диаметром 1 м, помещенной в водный черенковский детектор вето (цилиндрический бак диаметром 2.4 м и высотой 2.8 м). Акриловая сфера с жидким сцинтиллятором просматривается 20-ю фотоумножителями R7081-100 WA-S70 со стеклообложкой диаметром 10 дюймов. Произведен физический запуск прототипа и осуществляется его успешная эксплуатация.
2. Разработан и создан жидкий органический сцинтиллятор для полутонного прототипа проекта ББНТ на основе линейного алкилбензола со сцинтилляционной добавкой PPO с концентрацией 2 г/л и со спектросмещающей добавкой bis-MSB с концентрацией 10 мг/л.
3. Разработана и создана электронная система регистрации событий полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа на базе электронных модулей CAEN: быстродействующих оцифровщиков импульсов V1730S, модулей программируемой логики V2495 и высоковольтных источников питания V6533. А также разработан и создан пакет программного обеспечения на языке программирования C++ с использованием фреймворка Qt для управления элементами электронной системы регистрации и для считывания, записи и обработки сигналов.
4. Разработаны и созданы методы и средства отбора, тестирования и исследования параметров фотоэлектронных умножителей и жидкого сцинтиллятора полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа.
5. Исследованы крупногабаритные вакуумные фотоумножители для использования в прототипах Баксанского большого нейтринного телескопа. Отобраны, протестированы и исследованы параметры фотоумножителей R7081-100 WA-S70 производства Hamamatsu Photonics для полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа. Во всех исследованных фотоумножителях зарегистрированы послеимпульсы с аномально большими временами задержки от основных импульсов. Времена задержки от основного импульса этих послеимпульсов лежат в диапазоне 50–250 мкс.

Список литературы

1. Spectroscopy of geoneutrinos from 2056 days of Borexino data / M. Agostini [et al.] // *Physica B*. — 2005. — Vol. 355. — P. 116—25.
2. Large-volume detector at the Baksan Neutrino Observatory for studies of natural neutrino fluxes for purposes of geo- and astrophysics / I. R. Barabanov [et al.] // *Phys. At. Nucl.* — 2017. — Vol. 80. — P. 446—54.
3. First Results from KamLAND: Evidence for Reactor Antineutrino Disappearance / K. Eguchi [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2003. — Vol. 90. — P. 021802.
4. Physics prospects of the Jinping neutrino experiment / J. F. Beacom [et al.] // *Chin. Phys.* — 2017. — Vol. 41. — P. 023002.
5. Neutrino physics with JUNO / F. An [et al.] // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* — 2016. — Vol. 43. — P. 030401.
6. Current Status and Future Prospects of the SNO+ Experiment / S. Andringa [et al.] // *Adv. High Energy Phys.* — 2016. — Vol. 2016. — P. 6194250.
7. Measurement of the solar neutrino capture rate with gallium metal / J. N. Abdurashitov [et al.] // *Phys. Rev. C*. — 1999. — Vol. 60, issue 5. — P. 055801.
8. Solar neutrinos observed by GALLEX at Gran Sasso / M. Altmann [et al.] // *Phys. Lett. B*. — 1992. — Vol. 285, no. 4. — P. 376—389.
9. The Super-Kamiokande detector / S. Fukuda [et al.] // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. — 2003. — Vol. 501, no. 2. — P. 418—462.
10. Measurement of the Rate of $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ Interactions Produced by 8B Solar Neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory / Q. R. Ahmad [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2001. — Vol. 87, issue 7. — P. 071301.
11. Интенсивность мюонов космических лучей в лаборатории глубокого заложения ГГНТ / В. Н. Гаврин [и др.]. — Москва, 1991. — (Препринт / ИЛИ АН СССР П-698).
12. Низкофоновая лаборатория глубокого заложения Галлий-германиевого нейтринного телескопа / В. Н. Гаврин [и др.]. — Москва, 1991. — (Препринт / ИЛИ АН СССР П-690).
13. High-sensitive spectrometer of fast neutrons and the results of fast neutron background flux measurements at the Gallium–Germanium Solar Neutrino Experiment / J. N. Abdurashitov [et al.] // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. — 2002. — Vol. 476. — P. 322—326.
14. Modeling of a MeV-scale particle detector based on organic liquid scintillator / Y. Malyskin [et al.] // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. — 2020. — Vol. 951. — P. 162920.

15. Geant4—a simulation toolkit / S. Agostinelli [et al.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. — 2003. — Vol. 506, no. 3. — P. 250—303.
16. *Tseung, H. W. C.* Ellipsometric measurements of the refractive indices of linear alkylbenzene and EJ-301 scintillators from 210 to 1000 nm / H. W. C. Tseung, N. Tolich // Phys. Scr. — 2011. — Vol. 84, no. 3. — P. 035701.
17. Refractive index measurements of poly(methyl methacrylate) (PMMA) from 0.4–1.6 μm / G. Beadie [et al.] // Appl. Opt. — 2015. — Vol. 54, no. 31. — F139—F143.
18. Working characteristics of the New Low-Background Laboratory (DULB-4900) / J. M. Gavriljuk [et al.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. — 2013. — Vol. 729, no. 3. — P. 576—580.
19. *Becker, W.* Advanced Time-Correlated Single Photon Counting Techniques / W. Becker. — 1st ed. — Berlin : Springer, 2015. — P. 61. 401 p.
20. *Новикова, Г. Я.* Современные методы очистки жидких сцинтилляторов, предназначенных для регистрации редких событий / Г. Я. Новикова // Физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2018. — Т. 49, № 4. — С. 1360—1373.
21. Исследование эффективности методов очистки жидкого сцинтиллятора от U, Th, K / И. Р. Барабанов [и др.] // Радиохимия. — 2016. — Т. 58, № 6. — С. 535—539.
22. A scintillator purification system for a large scale solar neutrino experiment / J. B. Benziger [et al.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. — 1998. — Vol. 417, no. 2. — P. 278—296.
23. *Bonvicini, G.* The chemical history of ^{14}C in deep oilfields / G. Bonvicini, N. Harris, V. Paolone. — 2003.
24. Measurement of the ^{14}C Content in Liquid Scintillators by Means of a Small-Volume Detector in the Low-Background Chamber of the Baksan Neutrino Observatory / I. R. Barabanov [et al.]. — 2017.
25. Development of calibration system for a project of a new Baksan Large Neutrino Telescope / D. Voronin [et al.] // Proceedings of 37th International Cosmic Ray Conference — PoS(ICRC2021). Vol. 395. — 2021. — P. 1100.
26. *Lubsandorzhev, B. K.* Studies of “Kapustinsky’s” light pulser timing characteristics / B. K. Lubsandorzhev, Y. E. Vyatchin // J. Instrum. — 2006. — Vol. 1. — T06001.
27. A fast timing light pulser for scintillation detectors / J. S. Kapustinsky [et al.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. — 1985. — Vol. 241, no. 2. — P. 612—613.

28. *Poleshchuk, R. V.* An observation of a new class of afterpulses with delay time in the range of 70–200 μs in classical vacuum photomultipliers / R. V. Poleshchuk, B. K. Lubsandorzhev, R. V. Vasiliev // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. — 2012. — Vol. 695. — P. 362–364.
29. The calibration system of the GERDA muon veto Cherenkov detector / F. Ritter [et al.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. — 2010. — Vol. 617, no. 1. — P. 420–421.

Научное издание

Ушаков Никита Андреевич

Разработка и создание полутонного прототипа
Баксанского большого нейтринного телескопа

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,4 Зак. № 22486 Тираж 80 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а