

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

На правах рукописи

Айнутдинов Владимир Маратович

**Кластер Baikal-GVD – основная структурная единица Байкальского
глубоководного нейтринного телескопа**

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

*Диссертация на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук*

МОСКВА 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Глава 1. Черенковские детекторы в нейтринной астрофизике высоких энергий	19
1.1. Основные направления исследований на нейтринных телескопах	20
1.2. Принцип работы нейтринных телескопов	28
1.3. История развития и современное состояние проектов нейтринных телескопов	34
1.4. Сравнительные характеристики нейтринных телескопов	48
Глава 2. Этапы разработки проекта и общая концепция нейтринного телескопа Baikal-GVD	55
2.1. Байкальская нейтринная обсерватория	55
2.2. Разработка базовых элементов системы регистрации и сбора данных	61
2.3. Архитектура регистрирующей системы Baikal-GVD и оптимизация конфигурации телескопа	80
Глава 3. Оптический модуль Baikal-GVD	91
3.1. Основные компоненты оптического модуля	91
3.2. Исследования характеристик оптических модулей	104
3.3. Подготовка оптических модулей	119
Глава 4. Система сбора данных	127
4.1. Аппаратура системы сбора данных	127
4.2. Измерительный канал и его характеристики	136
4.3. Структурные элементы системы сбора данных	141
Глава 5. Натурные испытания аппаратуры нейтринного телескопа Baikal-GVD	157
5.1. Этапы развертывания установки и полученный экспериментальный материал	157

5.2. Работа установки в калибровочных режимах	171
5.3. Регистрация мюонов и каскадных ливней	185
Заключение	194
Список сокращений и условных обозначений	198
Список литературы	199
Список рисунков	209
Список таблиц	217

Введение

Диссертационная работа “Кластер Baikal-GVD – основная структурная единица Байкальского глубоководного нейтринного телескопа” выполнена в соответствии с научной программой исследований Президиума РАН и государственным заданием по развитию фундаментальных и прикладных исследований. В создании Байкальского глубоководного нейтринного телескопа принимает участие более 60 научных сотрудников и инженеров из 9 российских и иностранных научных институтов - членов международной коллаборации Baikal. В результате проведенных научных исследований, конструкторских разработок, организации производства и монтажа уникального глубоководного оборудования в оз. Байкал введен в эксплуатацию нейтринный телескоп с эффективным объемом $0,1 \text{ км}^3$, состоящий из двух кластеров оптических модулей, и созданы условия для развертывания первой очереди нейтринного телескопа Baikal-GVD из восьми аналогичных кластеров с суммарным объемом $\sim 0,5 \text{ км}^3$ к 2020 году.

Актуальность

Изучение галактических и внегалактических источников и механизмов генерации нейтрино сверхвысоких энергий является актуальной задачей в области астрофизики элементарных частиц. В последние два десятилетия наблюдается бурное развитие физики частиц, а также астрофизики и космологии, изучающих процессы, протекающие при энергиях недоступных ускорителям. Это нашло свое отражение в создании ряда крупномасштабных детекторов (нейтринных телескопов), предназначенных для решения широкого круга научных задач астрофизики элементарных частиц: исследование высокоэнергичных процессов в астрофизических объектах и во Вселенной в целом с помощью нейтрино высоких энергий, исследования фундаментальных физических проблем (в т.ч. поиск нейтрино, образующихся в результате аннигиляции или распада частиц темной

материи), изучение космических лучей с помощью атмосферных мюонов, мониторинг Галактики с точки зрения регистрации нейтрино от вспышек сверхновых.

Идея регистрации элементарных частиц на крупномасштабных черенковских детекторах в естественных прозрачных средах была впервые высказана в начале 60-х годов прошлого века выдающимся советским ученым М.А. Марковым [1]. По предложению академика А.Е. Чудакова в СССР началась разработка метода глубоководного детектирования, ориентирующаяся на оз. Байкал как на полигон для испытаний и место развертывания будущих крупномасштабных нейтринных телескопов. В период с 1993 г. по 1998 г. на Байкале был развернут первый в мире глубоководный нейтринный телескоп НТ200 [2]. Уже из набора экспериментальных данных 1994 года были выделены первые в мировой практике глубоководных и подледных экспериментов события от нейтрино.

Идея глубоководной регистрации в своей ледовой модификации, когда вместо естественного водоема фотодетекторы погружаются в прозрачный антарктический лед, привела к созданию на Южном полюсе нейтринного телескопа AMANDA [3] и, на основе опыта его эксплуатации, детектора IceCube [4] с инструментальным объемом $\sim 1 \text{ км}^3$. На установке IceCube в 2010–2013 гг. были впервые зарегистрированы “астрофизические” нейтрино, т.е. нейтрино, родившиеся за пределами солнечной системы. Результат, полученный в эксперименте IceCube, ответил на вопрос о величине потока нейтрино астрофизической природы и определил необходимый уровень чувствительности экспериментов при решении задач нейтринной астрофизики высоких энергий. Поскольку детекторы Северного полушария ANTARES и НТ200 не обладали необходимым уровнем чувствительности к нейтринному потоку, стала очевидной необходимость создания нейтринных телескопов на порядок большего объема с тем, чтобы вести исследование источников нейтрино высоких энергий по всей небесной сфере. К наиболее

значимым проектам детекторов Северного полушария следует отнести Baikal-GVD (оз. Байкал) и KM3NeT (Средиземное море) [5] в рамках которых к 2020 году планируется создание нейтринных телескопов масштаба кубического километра.

Для координации работ по созданию и проведению физических исследований на нейтринных телескопах в октябре 2013 года была создана новая научная структура: GNN (Global Neutrino Network) как первый этап в формировании консорциума Глобальная нейтринная обсерватория (GNO) с участием всех действующих в этой области международных коллабораций: ANTARES, Baikal, IceCube, KM3NeT. Развитие такого взаимодействия должно повысить уровень надежности и достоверности представляемых результатов, ускорить поиск необходимых технических решений, а также позволит вести совместный поиск и изучение источников нейтрино высоких энергий на всей небесной сфере. Нейтринный телескоп Baikal-GVD должен стать одной из ключевых установок будущей международной нейтринной обсерватории.

Цель работы, задачи и методы исследования

Цель работы – создание законченной конструктивной единицы (кластера) Байкальского глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD масштаба кубического километра для регистрации астрофизических нейтрино высоких энергий. Концепция Baikal-GVD основана на том, что нейтринный телескоп будет представлять собой пространственную структуру фотодетекторов, сгруппированных в кластеры. Каждый кластер является функционально независимым детектором с эффективным объемом $\sim 0,05 \text{ км}^3$, способным регистрировать нейтринные события как самостоятельно, так и в составе полномасштабного телескопа. Кластерная структура телескопа позволяет вести набор экспериментальных данных и научные исследования уже на ранних этапах развертывания установки.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Исследования подходов и методов регистрации нейтрино высоких энергий по черенковскому излучению продуктов их взаимодействия: мюонам и каскадным ливням с целью определения физических и технических требований к регистрирующей системе детектора.
2. Разработка научно-технического проекта Байкальского глубоководного нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба.
3. Исследования и разработка фотодетектора черенковского излучения – оптического модуля, оптимизированного для использования в составе детектора Baikal-GVD и соответствующего требованиям, предъявляемым к нейтринным телескопам нового поколения, по уровню чувствительности, временному разрешению, функциональным возможностям и надежности.
4. Разработка концепции и оптимизация конфигурации регистрирующей системы Baikal-GVD с учетом характеристик водной среды озера Байкал.
5. Разработка архитектуры системы сбора данных телескопа, обеспечивающей совместное эффективное функционирование ее основных элементов: триггерной системы, систем калибровки и мониторинга, электронных модулей обработки и передачи информации.
6. Создание функционально законченного комплекса аппаратуры и технических средств системы регистрации и сбора данных детектора, проведение лабораторных и натурных исследований аппаратуры с целью оценки ее надежности и корректности функционирования.
7. Разработка методики и организация подготовки и контроля электронных систем детектора в условиях их массового производства (~600 оптических модулей в год), обеспечивающей высокий уровень производительности работ, достижение требуемых технических характеристик, индивидуальную паспортизацию и необходимый уровень надежности аппаратуры.

8. Проведение полномасштабных долговременных испытаний системы регистрации и сбора данных нейтринного телескопа Baikal-GVD.
9. Экспериментальные исследования характеристик нейтринного телескопа и корректности его работы в режиме регистрации мюонов и каскадных ливней.

Материал, включенный в диссертацию, получен в результате целевых научных исследований, выполненных в процессе проектирования телескопа, разработки и организации производства регистрирующей аппаратуры, ввода в эксплуатацию первых двух кластеров Baikal-GVD, включающих в свой состав 576 фотодетекторов. Методика разработки телескопа была основана на результатах модельных расчетов, лабораторных исследований регистрирующей аппаратуры и ее долговременных натурных испытаниях в оз. Байкал. При оптимизации конфигурации и характеристик регистрирующей системы детектора учитывались как физические требования (чувствительность, точность измерения и динамический диапазон каналов, временная стабильность и надежность аппаратуры), так и ряд дополнительных факторов: возможности интеграции программных и аппаратных средств, точность калибровочных процедур, электропитание глубоководной аппаратуры, подавление шумов, термические и физические воздействия на аппаратуру, технические риски, обеспечение качества производства компонент детектора, развертывание установки, обеспечение персоналом, стоимость.

Можно выделить три основных этапа работ по созданию нового нейтринного телескопа в оз. Байкал. В течение 2006 – 2010 гг. были проведены исследования, связанные с разработкой базовых элементов и систем телескопа Baikal-GVD, изготовлены опытные образцы регистрирующей аппаратуры и проведены их испытания в условиях совместной работы с детектором NT200+. Результатом этих исследований стало создание первой экспериментальной гирлянды оптических модулей и

подготовка научно-технического проекта Байкальского глубоководного нейтринного телескопа.

В 2011 г. начался заключительный этап комплексных натурных испытаний базовых элементов и систем телескопа в составе гирлянд оптических модулей. Результатом этого этапа было создание и ввод в эксплуатацию в апреле 2015 года первого кластера нейтринного телескопа Baikal-GVD: детектора «Дубна». Текущим этапом развития проекта Baikal-GVD является последовательное увеличение объема телескопа за счет развертывания новых кластеров на основе законченных исследований, разработок и созданных производственных мощностей. В 2016 году первый кластер был “достроен” до штатной конфигурации (288 оптических модулей). В 2017 году был введен в эксплуатацию второй кластер Baikal-GVD.

В настоящее время Байкальский нейтринный телескоп состоит из 576 оптических модулей и, вместе с установкой ANTARES, входит в состав двух крупнейших детекторов нейтрино высоких энергий в Северном полушарии. К 2020 г. планируется создание первой очереди Baikal-GVD, состоящей из 8 кластеров с суммарным эффективным объемом порядка 0,5 куб. км (проект GVD-1), сопоставимым с чувствительным объемом IceCube для регистрации нейтрино высоких энергий. Ожидается, что вторая очередь нейтринного телескопа на оз. Байкал будет содержать 24 кластера с общим объемом порядка 1,5 км³.

Необходимо отметить, что научные исследования по совершенствованию системы сбора и обработки данных телескопа проводятся непрерывно и их результаты позволяют улучшать характеристики как вновь развертываемых кластеров, так и уже установленных заменой электронных блоков во время ежегодных регламентных работ по поддержанию работоспособности систем телескопа. В результате этих исследований были существенно расширены

функциональные возможности глубоководных систем обработки данных, калибровки и мониторинга параметров аппаратуры, была существенно повышена пропускная способность линий передачи данных, уменьшено «мертвое время» при регистрации событий, повышена надежность работы телескопа и т. д. Возможность модернизации электронных систем нейтринного телескопа в сочетании с простотой изменения его конфигурации является одним из важных преимуществ Байкальского проекта, позволяющего адаптировать его к решению новых физических задач и продлевать срок эксплуатации детектора.

Научная новизна и практическая значимость

Создание и ввод в эксплуатацию двух кластеров Baikal-GVD с суммарным эффективным объемом $0,1 \text{ км}^3$ открывает новые возможности для проведения исследований в области физики космических лучей и нейтринной астрофизики. Впервые в Северном полушарии создана установка, позволяющая регистрировать нейтрино высоких энергий от астрофизических источников. По мере своего развития установка позволит превзойти IceCube по важнейшей характеристике – угловому разрешению, что открывает реальные возможности по развитию нового научного направления “нейтринная астрономия”.

Глубоководный оптический модуль на основе фотоэлектронного умножителя с полусферическим фотокатодом диаметром 250 мм с повышенной квантовой чувствительностью ($\sim 35\%$), оснащенный оригинальной системой светодиодной калибровки является уникальным прибором, разработанным с учетом его использования в водной среде озера Байкал, условий монтажа с ледового покрова озера, интеграции в систему сбора данных нейтринного телескопа. Разработка может быть использована в установках, для которых требуется регистрация слабых потоков излучения в оптическом диапазоне.

Новый подход к организации системы сбора данных в глубоководном исполнении, основанный на применении локальных сетей с использованием удлинителей *Ethernet*, в сочетании с разработанной методикой фильтрации данных в режиме реального времени обеспечил стабильную работу Байкальского телескопа и может быть применен в детекторах с распределенной системой регистрирующих элементов, в которых затруднено использование оптических линий передачи данных.

Ввод в эксплуатацию первых кластеров Baikal-GVD является определяющим шагом на пути к созданию детектора нового поколения: нейтринного телескопа на оз. Байкал масштаба кубического километра. Такой телескоп станет одной из ключевых установок Глобальной нейтринной сети в международном научном консорциуме «Глобальная нейтринная обсерватория» (Меморандум от 19 октября 2013 г.).

На защиту выносятся:

1. Результаты завершенного цикла исследований, разработок и производства, реализованные в создании уникальной исследовательской установки на оз. Байкал, являющейся базой для создания глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD масштаба кубического километра.
2. Масштабируемая модульная архитектура системы регистрации и сбора данных нейтринного телескопа Baikal-GVD, которая обеспечивает эффективное развертывание установки со льда оз. Байкал, простоту ее наращиваемости и возможность адаптации для решения различных физических задач, а также проведение физических исследований уже на ранних стадиях развертывания установки.
3. Результаты оптимизации конфигурации детектора, триггерных условий регистрации, функционального состава и технических параметров измерительной аппаратуры, обеспечившие величину эффективного объема для регистрации каскадных ливней одним кластером нейтринного

телескопа $\sim 0,05$ куб. км, и точность восстановления направления мюонных треков $\sim 0,5^\circ$.

4. Новый фотодетектор (оптический модуль) для нейтринного телескопа Baikal-GVD на базе ФЭУ R7081-100, оснащенный системами управления, калибровки и мониторинга его параметров и обеспечивающий эффективную регистрацию слабых черенковских вспышек, генерируемых релятивистскими заряженными частицами.
5. Комплекс физической аппаратуры, включающий в свой состав глубоководные модули и межмодульные коммуникации, обеспечивающие регистрацию сигналов, выработку триггера, формирование временных кадров событий, предварительную обработку и передачу информации в Береговой центр сбора данных, калибровку каналов установки, управление электропитанием всех узлов детектора.
6. Методика и аппаратные средства калибровки каналов установки без применения внешних источников света, обеспечивающие точность измерения временных задержек каналов на уровне ~ 2 нс и величину динамического диапазона каналов до $\sim 10^4$ ф.э.
7. Положительные результаты многолетних натуральных испытаний аппаратуры нейтринного телескопа Baikal-GVD, продемонстрировавшие работоспособность и устойчивость системы регистрации и сбора данных установки и надежность работы измерительных каналов на уровне 10^{-2} отказов в год.
8. Результаты работ по вводу в эксплуатацию в режиме постоянной экспозиции первых двух кластеров телескопа Baikal-GVD с суммарным эффективным объемом 0,1 куб. км, представляющие собой на настоящий момент времени один из крупнейших нейтринных телескопов Северного полушария.

Личный вклад автора

- Автор принимал участие в экспериментальных исследованиях, обработке и анализе данных, полученных на нейтринном телескопе NT200. Им получен предел на поток нейтрино, сопровождающих гамма-всплески.
- Автор принимал участие в разработке и создании системы сбора данных нейтринного телескопа NT200+.
- Автором была разработана общая концепция и архитектура системы регистрации и сбора данных установки Baikal-GVD.
- Автор осуществлял руководство исследованиями, разработкой и созданием основных электронных систем нейтринного телескопа: оптического модуля, измерительного канала на базе наносекундных АЦП, аппаратуры для управления работой, контроля и калибровки детектора.
- Автором были разработаны методы временной калибровки каналов установки и принципы построения системы формирования триггера.
- С 2007 года автор руководит работами по изготовлению, наладке и тестированию аппаратуры Baikal-GVD.
- Автор участвовал в экспериментах на озере Байкал с 2004 года. С 2007 года руководил работами по наладке и натурным испытаниям глубоководных установок во время экспедиций на оз. Байкал.
- Осуществлял научное руководство исследованиями и подготовкой к защите диссертаций на степень магистра двух выпускников МФТИ и трех диссертаций на степень кандидата физико-математических наук сотрудников ИЯИ РАН, результаты которых использованы в данной работе.

Апробация работы

Результаты исследования были представлены на международных и российских конференциях и рабочих совещаниях:

1. Международная конференция по космическим лучам (International Cosmic Ray Conference - ICRC): Пекин – 2011, Рио-де-Жанейро – 2013, Гаага – 2015, Пусан – 2017.
2. Международный симпозиум по нейтринным телескопам Средиземного моря и Антарктики (Mediterranean and Antarctic Neutrino Telescope Symposium - MANTS): Болонья – 2012, Гархинг – 2013, Женева – 2014, Майнц – 2016.
3. Международное совещание по крупномасштабным нейтринным телескопам (International Workshop “Very Large Volume Neutrino Telescope” – VLVNT): Тулон – 2008, Афины – 2009, Эрланген – 2011, Рим – 2015.
4. Римская международная конференция по космомикробиологии (Roma International Conference on Astroparticle Physics – RICAP): Рим – 2011, Рим – 2013, Ното – 2014, Фраскати – 2016.
5. Международное рабочее совещание по черенковским детекторам (International workshop “Ring Imaging Cherenkov Detectors” – RICH): Кассис – 2014.
6. Международное совещание по нейтринным телескопам (International workshop on Neutrino Telescopes): Венеция – 2017.
7. Школа “Частицы и космология”: Троицк – 2011.
8. Конференция “Восьмые Черенковские чтения”: Москва – 2015.
9. Международное совещание “Нейтринная физика и Астрофизика” (“The International Workshop on Prospects of Particle Physics: “Neutrino Physics and Astrophysics”) Валдай – 2015.
10. Всероссийская конференция по космическим лучам: Дубна – 2014.

11. Рабочие совещания международного сотрудничества «Байкал» (два совещания ежегодно): Дубна – 2008 -2017 гг.

Список публикаций по теме диссертации

Результаты опубликованы в 32 работах, из них 23 статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК.

1. V.M. Aynutdinov, V.A. Balkanov, I.A. Belolaptikov et al. /The Baikal Neutrino Telescope // Physics of Atomic Nuclei V.69, #11 (2006) p.1914-1921.
2. V. Aynutdinov, V. Balkanov, I. Belolaptikov et al /The BAIKAL neutrino experiment: from NT200 to NT200+ // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, V. 567 (2006) p. 433-437.
3. V.M. Айнутдинов, В.А. Балканов, И.А. Белолаптиков и др., /Байкальский нейтринный телескоп: статус, результаты и перспективы развития // Известия РАН, Сер. Физ., т. 71, № 4, (2007) с. 597-601.
4. V.Aynutdinov, V. Balkanov, I. Belolaptikov et al. /The Baikal neutrino experiment: NT200+ and beyond // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, V. 572 (2007) p. 511-514.
5. V.Aynutdinov, V. Balkanov, I. Belolaptikov et al. /The BAIKAL neutrino experiment: status, selected physics results, and perspectives // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, V. 588 (2008) p. 99-106.
6. V.Aynutdinov, V. Balkanov, I. Belolaptikov et al. /The prototype string for the km³-scale Baikal neutrino telescope // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, V. 602 (2009) p. 227-234.
7. A. Avrorin, V. Aynutdinov, V. Balkanov et al. /Baikal neutrino telescope - an underwater laboratory for astroparticle physics and environmental studies // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, V. 598 (2009) p. 282–288.
8. В.М. Айнутдинов, А.В. Аврорин и др. /Статус байкальского нейтринного эксперимента // Известия РАН, Сер. Физ., т. 73. № 5 (2009) с. 682-684.

9. А.В. Аврорин, В.М. Айнутдинов, В.А. Балканов и др. /Байкальский нейтринный проект – история и перспективы // Известия высших учебных заведений. Физика. Т. 53 №6 (2010) с. 52-61.
10. A. Avrorin, V. Aynutdinov, I. Belolaptikov et al. /The Baikal neutrino experiment // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, V. 626 (2011) p. 13-18.
11. A. Avrorin, V. Aynutdinov, V. Balkanov et al. /The Baikal Neutrino Project: Present and perspective // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, V. 628 (2011) p.115-119.
12. А.В. Аврорин, В.М. Айнутдинов, И.А. Белолаптиков и др. /Поиск нейтрино от гамма-всплесков на Байкальском нейтринном телескопе НТ200 // Письма в Астрономический журнал: Астрономия и космическая астрофизика. Т. 37 №10 (2011) с. 754-760.
13. A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, I.A. Belolaptikov et al. /The Baikal neutrino telescope - Results and plans // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, V. 630 (2011) p. 115-118.
14. A. Avrorin, V. Aynutdinov, I. Belolaptikov et al. /The Gigaton volume detector in lake Baikal // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, V. 639 (2011) p. 30-32.
15. А.В. Аврорин, В.М. Айнутдинов, И.А. Белолаптиков и др. /Статус байкальского нейтринного эксперимента // Известия РАН, сер. Физ., т. 75. № 3 (2011) с. 443-444.
16. А.В. Аврорин, В.М. Айнутдинов, И.А. Белолаптиков и др.
/Экспериментальная гирлянда Байкальского нейтринного телескопа НТ1000 // Приборы и Техника Эксперимента, № 5 (2011) с. 55-65.
17. A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, I.A. Belolaptikov et al. /Status of the BAIKAL-GVD project // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, V. 692 (2012) p. 46-52.
18. A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, I.A. Belolaptikov et al. /Current status of the BAIKAL-GVD project // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, V. 725 (2013) p. 23-26.
19. A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, I.A. Belolaptikov et al. /Present status of the BAIKAL-GVD project development // Journal of Physics: Conference Series. V.

- 409 #1 (2013).
20. A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /The prototyping/early construction phase of the BAIKAL-GVD project // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, V. 742 (2014) p. 82-88.
 21. А.В. Аврорин, А.Д. Аврорин, Айнутдинов В.М. и др. /Система сбора данных Байкальского нейтринного телескопа НТ1000 // Приборы и Техника Эксперимента. № 3 (2014) с. 28-39.
 22. А.В. Аврорин, А.Д. Аврорин, Айнутдинов В.М. и др. /Статус и последние результаты проекта Байкал-ГВД // Физика элементарных частиц и атомного ядра. Т. 46, Вып. 2 (2015) с 211-221.
 23. A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /Status of the Baikal-GVD Project // Proceedings 16th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics: Particle Physics at the Year of Centenary of Bruno Pontecorvo (2015) p.99–101.
 24. A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, et al. /The optical module of Baikal-GVD // EPJ Web of Conferences, V. 116 (2016) p. 01003.
 25. A.V. Avrorin, A.D. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /Baikal-GVD results // EPJ Web of Conferences, V. 116 (2016) p. 11005.
 26. A.V. Avrorin, A.D. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /Status of the early construction phase of Baikal-GVD // Nuclear and Particle Physics Proceedings V. 273 (2016) p. 314-320.
 27. A.V. Avrorin, A.D. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /The data acquisition system for Baikal-GVD // EPJ Web of Conferences, V. 116 (2016) p. 5004.
 28. A.V. Avrorin, A.D. Avrorin, V. M. Aynutdinov et al. /The optical detection unit for Baikal-GVD neutrino telescope // EPJ Web of Conferences, V. 121 (2016) p. 05008.
 29. A.V. Avrorin, A.D. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /The optical module of Baikal-GVD // EPJ Web of Conferences, V. 116 (2016) p. 1003.
 30. A.V. Avrorin, A.D. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /Status and perspectives of the BAIKAL-GVD project // EPJ Web of Conferences, V. 121 (2016) p. 5003.

31. А.В. Аврорин, А.Д. Аврорин, В.М. Айнутдинов и др. /Оптический модуль Глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD // Письма в журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра». Т. 13 № 6 (2016) с. 756–766.
32. A.V. Avrorin, A.D. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /Baikal-GVD: Results, status and plans // The European Phys. J. Web of Conf., V. 116 (2016) p. 11005.

Глава 1. Черенковские детекторы в нейтринной астрофизике высоких энергий

По используемым методам регистрации нейтрино, природный поток нейтрино можно условно разбить на три энергетических диапазона (см. рисунок 1.1) [6]. В диапазоне энергий от 10^5 эВ до 10^9 эВ основные результаты получены в экспериментах, выполнявшихся в условиях подземных лабораторий. Верхняя граница следующего диапазона ($10^9 - 10^{18}$) эВ достаточно размыта, так как основным инструментом исследования здесь стали крупномасштабные черенковские детекторы (нейтринные телескопы), создаваемые в прозрачных естественных средах, возможности увеличения чувствительности которых еще далеко не исчерпаны. В основе исследований природных потоков нейтрино высоких и сверхвысоких энергий в экспериментах на нейтринных телескопах лежит метод регистрации черенковского излучения вторичных мюонов либо электромагнитных или адронных ливней образующихся в нейтринных взаимодействиях набором фотодетекторов, размещенных в виде объемной решетки на расстояниях от десятков до сотен метров друг от друга. К настоящему времени разработана методика глубоководного детектирования элементарных частиц, созданы первые детекторы последовательно на оз. Байкал, в Антарктиде на Южном полюсе (AMANDA), в Средиземном море (ANTARES) и, наконец, крупнейшая на сегодняшний день установка IceCube с рабочим объемом кубический километр антарктического льда, на которой в 2010 – 2013 годах были впервые зарегистрированы астрофизические нейтрино высоких энергий. Энергия самого мощного из этих событий оценивается величиной порядка $2 \cdot 10^{15}$ эВ. Исследования диффузного потока нейтрино ведутся уже на уровне чувствительности, который на три порядка превышает чувствительность крупнейших подземных детекторов.

Надежды на продвижение исследований потоков нейтрино в область энергий свыше 10^{18} эВ связываются обычно либо с развитием методов

акустического детектирования и созданием на их основе детекторов огромных объемов в естественных водоемах, либо с регистрацией нейтринных событий на детекторах ШАЛ, либо с развитием методов регистрации радиосигнала от нейтрино.

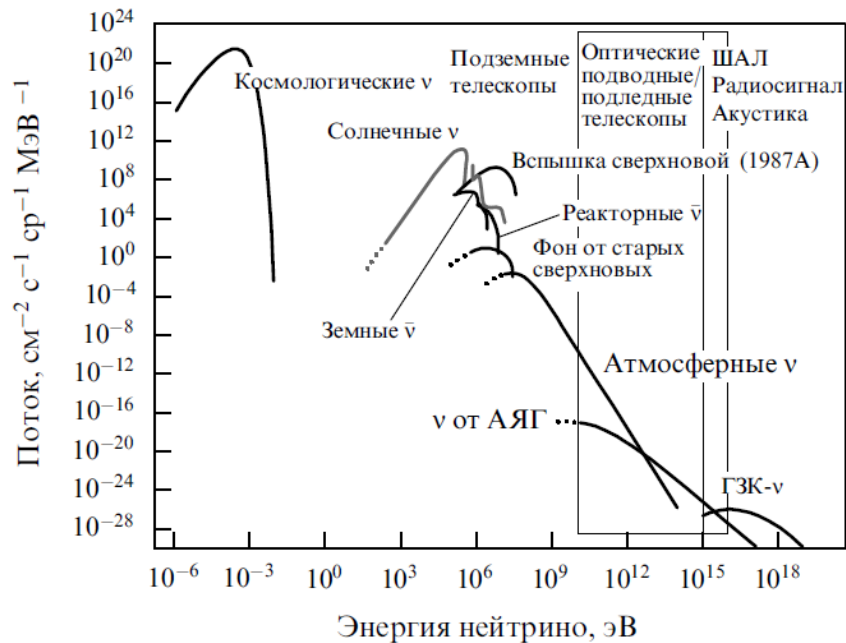


Рис.1.1. *Природные потоки нейтрино на уровне Земли: АЯГ - активные ядра галактик, ГЗК - область предельных энергий космических лучей согласно эффекту Грейзена-Зацепина-Кузьмина, ν - нейтрино.*

1.1. Основные направления исследований на нейтринных телескопах

Нейтрино астрофизической природы. Исследования потоков нейтрино астрофизической природы с помощью нейтринных телескопов ведутся по двум направлениям [7, 8]. Первое направление исследований связано с поиском нейтринного сигнала от известных астрофизических объектов, либо с обнаружением не идентифицированных локальных источников из наблюдений превышения сигнала над уровнем фона по всей небесной сфере. Природные потоки нейтрино формируются в результате физических процессов, протекающих в астрофизических объектах, характеризующихся энерговыделением в диапазоне $\sim 10^{39} \dots 10^{52}$ эрг/с. Наиболее близкими по отношению к земному наблюдателю астрофизическими объектами,

способными, как предполагается в настоящее время, излучать высокоинтенсивные потоки нейтрино, расположены в основном в окрестности центра нашей Галактики и в галактической плоскости. Наиболее перспективными галактическими источниками являются остатки от взрывов сверхновых, пульсары, окрестность черной дыры Sgr A* в центре нашей Галактики, двойные звездные системы, содержащие черную дыру или нейтронную звезду, скопления молекулярных облаков, являющихся мишенью для протонов и ядер космических лучей. Энергетический спектр нейтрино от галактических источников лежит в диапазоне $10^3 - 10^6$ ГэВ.

К другому классу нейтринных источников, излучение которых может быть зарегистрировано нейтринными телескопами, относятся внегалактические объекты – активные ядра галактик, гамма-всплески, скопления галактик. Этот класс источников характеризуется существенно большим энерговыделением и генерирует нейтрино в диапазоне $10^4 - 10^8$ ГэВ и выше. Поиск сигналов от нейтринных источников накладывает высокие требования на разрешающую способность нейтринных телескопов как с точки зрения измерения энергии, так и измерения направления движения нейтрино.

Другим направлением изучения потока нейтрино является исследование энергетического спектра, глобальной анизотропии и состава по типу нейтрино диффузного потока нейтрино от не идентифицированных источников в области энергий выше 10^4 ГэВ, в которой фон от атмосферных нейтрино становится меньше величины ожидаемого потока нейтрино астрофизической природы. Диффузный поток нейтрино высоких энергий в окрестности Земли формируется нейтринным излучением от всей совокупности источников за время, начиная с отдаленных космологических эпох и до наших дней. Вклад в этот поток вносят внегалактические объекты, нейтрино, образующиеся в результате взаимодействия космических лучей с межзвездным веществом и электромагнитным излучением, включая

реликтовые фотоны (в случае ультравысоких энергий). Следует отметить, что определенную часть диффузного потока могли бы составлять нейтрино от распада сверхмассивных частиц, ассоциирующихся, в частности, с теориями великого объединения.

Стандартный подход, используемый широким кругом теоретических моделей, описывающих формирование нейтринных потоков в источниках космических лучей, предполагает рождение нейтрино в основном при распаде π -мезонов, образующихся в pp и $p\gamma$ взаимодействиях. В этом случае нейтринный поток, испускаемый источником, содержит нейтрино разного типа в пропорции $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau \approx 1 : 2 : 0$. Вследствие эффекта нейтринных осцилляций это соотношение меняется в зависимости от расстояния до источника. Длина $\nu_\mu - \nu_\tau$ осцилляций, при выборе параметров осцилляций $\delta m^2 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{эВ}^2$ и $\sin 2\theta = 1$, согласно данным эксперимента Super-Kamiokande [9], составляет $L_{osc} \sim 1,3 \cdot 10^{-4} (E_\nu / \text{ПэВ})$ парсек. Таким образом, длина осцилляций оказывается значительно меньше характерных расстояний до предполагаемых астрофизических источников нейтрино высоких энергий и соотношение между различными типами нейтрино в детектируемом потоке приобретает вид $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau \approx 1:1:1$.

Темная материя. Крупнейшей задачей современного естествознания является открытие частиц невидимой (темной) материи. Наблюдательные данные в области астрономии и космологии неопровержимо свидетельствуют о том, что в галактиках, скоплениях галактик и Вселенной в целом, помимо обычного вещества, имеется вещество нового типа – невидимая материя. Более того, в целом во Вселенной масса невидимой материи в 5 – 6 раз превышает массу обычного вещества, а вблизи Земли они находятся примерно в равном соотношении. Частицы невидимой материи чрезвычайно слабо взаимодействуют с обычным веществом. В связи с этим их прямая регистрация представляет собой сложнейшую задачу экспериментальной физики. Весьма перспективным является другой путь к

обнаружению частиц невидимой материи, связанных с поиском продуктов их аннигиляции в центре Земли, Солнца или центре Галактики. Среди этих продуктов должны быть нейтрино довольно высоких энергий, которые в свою очередь слабо взаимодействуют с веществом и проходят сквозь Землю или Солнце практически без поглощения. Регистрация нейтрино таких энергий успешно осуществляется на крупных подземных установках и нейтринных телескопах, размещенных в естественных средах. Методы поиска частиц невидимого вещества на этих установках заключаются в регистрации превышения мюонного потока из направления от центра массивного объекта (Земли, Солнца, Галактики) над фоном от атмосферных нейтрино. Подземные нейтринные детекторы имеют более низкий порог регистрации мюонов (~1-3 ГэВ) по сравнению с глубоководными (подледными) установками. Поэтому эти два класса детекторов дополняют друг друга. Первые из них эффективны для поиска частиц с массами менее 80 ГэВ (пороговая энергия рождения W-бозонов), а вторые – для исследования частиц с массой порядка сотни ГэВ и выше. Дальнейшее кардинальное увеличение чувствительности эксперимента к потоку мюонов от аннигиляции частиц невидимого вещества может быть достигнуто за счет увеличения их эффективной площади в 5 – 10 раз. В случае нейтринных телескопов проблема сводится к созданию установок кубокилометрового масштаба. В случае подземных установок такое увеличение эффективной площади подразумевает увеличение характерных размеров детектора до сотен метров и более.

Атмосферные нейтрино. Нейтрино атмосферного происхождения формируют наиболее интенсивный наблюдаемый в наземных экспериментах поток нейтрино в области энергий от сотен МэВ до сотен ТэВ. При взаимодействии космических лучей с веществом атмосферы рождается большое количество пионов и каонов. В результате реакций распада пионов, каонов и мюонов:

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu + \nu_{\mu}; K^{\pm} \rightarrow \mu + \nu_{\mu}; \mu \rightarrow e + \nu_{\mu} + \tilde{\nu}_e, \quad (1.1.1)$$

рождаются нейтрино, которые принято называть атмосферными. Вклад нейтрино от распада мюона существенен лишь до энергий порядка нескольких ГэВ, так как лоренцевское удлинение пробега мюона приводит к достижению мюоном поверхности земли до его распада. В диапазоне энергий от 1 до 100 ТэВ основным источником атмосферных нейтрино являются пионы и каоны. В области энергий $\sim 10^2 - 5 \times 10^4$ ГэВ спектр атмосферных нейтрино описывается выражением:

$$\frac{d^2 N}{dE_{\nu} d\Omega}(E_{\nu}, \theta) = A_{\nu} (E_{\nu}/GeV)^{-\gamma} \left[\frac{1}{1+6E_{\nu}/E_{\pi}(\theta)} + \frac{0.213}{1+1.44E_{\nu}/E_K(\theta)} \right], \quad (1.1.2)$$

где $A_{\nu} = 0,0285 \text{ ГэВ}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}$, $\gamma = 2,68$, E_{π} и E_K – критические энергии пионов и каонов (энергия, при которой вероятность распада равна вероятности взаимодействия), зависящая от зенитного угла θ . Первичные космические лучи распределены изотропно в окрестности Земли, однако, в результате взаимодействия с атмосферой, изотропия потоков вторичных частиц нарушается. Пионы и каоны, рожденные первичной частицей под большими зенитными углами, проходят через более разряженную атмосферу, где вероятность распада по сравнению с вероятностью взаимодействия больше. Поэтому поток нейтрино в горизонтальном направлении превышает поток в вертикальном направлении. С ростом энергии время жизни пионов и каонов увеличивается, и вероятность распада уменьшается по сравнению с вероятностью взаимодействия. Поэтому энергетический спектр нейтрино, рожденных от пионов и каонов, с ростом энергии становится круче первичного спектра космических лучей. Неопределенность в предсказаниях потоков нейтрино от пионов и каонов связана с неопределенностью потока и энергетического спектра космических лучей, а также неопределенностью в доле каонов и пионов, рождающихся в ядерных взаимодействиях при высоких энергиях. Различие в рассчитанных разными авторами спектрах атмосферных нейтрино от пионов и каонов составляет величину около 15%.

Другим механизмом рождения нейтрино атмосферного происхождения является распад чармированных мезонов и барионов со временем жизни 10^{-12} сек и меньше (так называемые нейтрино *быстрой генерации* или *прямые нейтрино*). Спектр прямых нейтрино практически повторяет спектр космических лучей. Экспериментально прямые нейтрино пока не обнаружены. Согласно расчетам, энергия, при которой потоки прямых нейтрино сравниваются с потоками нейтрино от пионов и каонов, зависят от модели взаимодействия первичных космических лучей с ядрами воздуха и от зенитного угла. Для вертикального потока нейтрино эта энергия находится в диапазоне $10^2 - 10^3$ ТэВ и увеличивается с ростом зенитного угла. Неопределенность ожидаемого потока атмосферных нейтрино в области 10^2 ТэВ обусловлена большими различиями в предсказаниях потока прямых нейтрино и достигает 100%.

С точки зрения экспериментов на нейтринных телескопах атмосферные нейтрино являются источником естественного неустранимого фона, который существенно усложняет процедуры выделения полезного сигнала. С другой стороны, в силу достаточно высокого уровня теоретического предсказания интенсивности и характеристик потока атмосферных нейтрино, этот поток может быть эффективно использован в качестве калибровочного нейтринного потока. Кроме того, поиск прямых нейтрино является важной научной задачей.

Магнитные монополи. В современную физическую теорию понятие магнитного монополя было введено в 1931 г. Дираком [10]. Им было показано, что любой магнитный заряд должен быть кратен минимальному возможному заряду g , однозначно связанному с минимальным электрическим зарядом:

$$g = (\hbar c / 2e) \approx \frac{137}{2} e \quad (1.1.3)$$

Таким образом, минимальный магнитный заряд примерно в 68,5 раз больше минимального электрического заряда. Из этого, в частности, следует, что

ионизационные потери энергии релятивистских монополей в среде значительно больше, чем у релятивистских мюонов, что открывает хорошие возможности для регистрации т. н. *быстрых* монополей в экспериментах на нейтринных телескопах. Теория черенковского излучения магнитных монополей была впервые исследована И. М. Франком [11]. Линейная плотность черенковского излучения с длиной волны λ (в предположении, что магнитная проницаемость среды $\mu = 1$) описывается выражением:

$$\frac{d^2 n_c}{dx d\lambda} = \frac{2\pi\alpha}{\lambda^2} \left(\frac{ng}{e}\right)^2 \left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2}\right), \quad (1.1.4)$$

где g – магнитный заряд монополя, e – заряд электрона, n – показатель преломления света в среде (для воды $n = 1,33$), $\beta = v/c$. Интенсивность черенковского излучения релятивистского монополя в $(ng/e)^2 \approx 8300$ раз превышает интенсивность излучения релятивистского мюона. Таким образом, магнитный монополь является ярким источником света, соответствующим по своей интенсивности мюону с энергией $\sim 10^4$ ТэВ. С середины 70-х годов прошлого века ведутся интенсивные поиски магнитных монополей, стимулированные работами [12, 13]. В этих работах впервые было показано, что следствием теорий Великого объединения является возможность существования во Вселенной топологических дефектов в виде магнитных монополей. Массы таких частиц, в зависимости от вариантов теории, лежат в широком диапазоне от 10^8 ГэВ/ c^2 до 10^{21} ГэВ/ c^2 . Наиболее надежными астрофизическими ограничениями на величину природного потока монополей являются предел Чудакова-Паркера [14-16], полученный из условия сохранения наблюдаемой напряженности галактических магнитных полей:

$$F_{mon} < 10^{-15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}, \quad (1.1.5)$$

и “космологическое” ограничение, которое вытекает из условия:

$$4\pi F_{mon} m_{mon} (c\beta)^{-1} < \rho_{cr} = 10^{-29} \text{ г см}^{-3}, \quad (1.1.6)$$

из которого следует:

$$F_{mon} < 1.4 \cdot 10^{-12} \beta [(10^{16} \text{ ГэВ}/c^2) / m_{mon}] \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}. \quad (1.1.7)$$

Оба эти ограничения не исключают возможность превышения приведенных предельных значений интенсивности потоков монополей, например, в Солнечной системе. В результате ускорения в галактических магнитных полях кинетическая энергия тяжелого магнитного монополя может достигать значений порядка 10^{11} ГэВ. После прохождения сквозь Землю монополи остаются квазирелятивистскими и могут быть зарегистрированы по своему черенковскому излучению в нейтринных телескопах как частицы, приходящие из нижней полусферы.

В 1981 г. была опубликована работа В.А. Рубакова [17], содержащая вывод о том, что в присутствии монополя Великого объединения процессы с не сохранением барионного числа не подавлены. Аналогичный вывод был сделан в 1982 г. К. Г. Калланом [18]. Сечение реакции катализа монополем барионного распада оценивалось как:

$$\sigma_{cat} = \sigma_0 / \beta_{mon}, \quad (1.1.8)$$

где σ_0 принималось равным по порядку величины характерным значениям сильных взаимодействий: $\sigma_0 \sim 10^{-28} \text{ см}^2$. Учет электромагнитного взаимодействия монополя и ядра, в состав которого входит нуклон, приводит к появлению в выражении для сечения катализа фактора $F(\beta_{mon}) = 0.17/\beta_{mon}$ для свободных протонов. Монополь, двигаясь в воде со скоростью меньше или порядка 10^{-3} , должен инициировать распад ядер водорода с сечением:

$$\sigma_{cat}^p = 0.17 \sigma_0 \beta_{mon}^{-2}. \quad (1.1.9)$$

Энергия, выделяющаяся при единичном акте катализа ($m_p c^2 = 938 \text{ МэВ}$), распределяется между продуктами распада протона. Последние, распространяясь в воде, становятся источниками черенковского излучения, которое генерируется также и их дочерними частицами: δ -электронами, e^+e^- парами и т.д. В результате каждого распада протона излучается до $N\gamma = 1.1 \times 10^5$ черенковских фотонов в интервале длин волн $300 < \lambda < 600 \text{ нм}$.

Таким образом, траектория монополя при пересечении водного объема должна выглядеть как цепочка черенковских вспышек. Если распады происходят достаточно часто, например $10^1 - 10^3$ на 1 см пути монополя, то скорость регистрации черенковских фотонов, излучаемых продуктами распада, может заметно превышать скорость счета импульсов ФЭУ, обусловленных темновым током и свечением водной среды. Метод поиска медленных монополей в экспериментах на нейтринных телескопах основан на выделении событий такого типа [19].

1.2. Принцип работы нейтринных телескопов

В основе исследований природных потоков нейтрино высоких и сверхвысоких энергий в экспериментах на глубоководных (подледных) нейтринных телескопах лежит метод регистрации черенковского излучения вторичных мюонов либо электромагнитных или адронных ливней, образующихся в нейтринных взаимодействиях, набором фотодетекторов, размещенных в узлах объемной решетки на расстояниях от десятков до сотен метров друг от друга. Нейтрино высоких энергий взаимодействуют с веществом мишени посредством реакций на нуклонах, реализующихся по каналам заряженных (CC) и нейтральных (NC) токов:

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + N \rightarrow l^-(l^+) + hadrons (CC), \quad (1.2.1)$$

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + N \rightarrow \nu_l(\bar{\nu}_l) + hadrons (NC), \quad (1.2.2)$$

где $l = e, \mu$ или τ . Взаимодействие нейтрино с электронами мишени практически не вносит вклада в общее число регистрируемых нейтринных событий за исключением резонансного рассеяния электронных нейтрино в области W -резонанса.

$$\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow W^- \rightarrow all, \quad (1.2.3)$$

с энергией в резонансе $E_0 = M_W^2/2m_e = 6.3 \times 10^6 \text{ ГэВ}$ и сечением $5.02 \times 10^{-31} \text{ см}^2$. Конечные продукты реакций (1.2.1) ... (1.2.3) – лептоны и ливни высоких энергий несут информацию об энергии, направлении движения и, в

принципе, о типе нейтрино. В экспериментах на глубоководных и подледных черенковских детекторах эффективный размер мишени зависит от типа и энергии нейтрино. В случае мюонных нейтрино, в силу высокой проникающей способности вторичных мюонов, нейтринной мишенью является как прозрачная среда в окрестности телескопа, так и грунт под установкой. В первом случае энергия мюонного нейтрино может быть оценена по результатам восстановления энергий мюона и ливня, генерируемого в вершине нейтринного взаимодействия. При взаимодействии мюонного нейтрино в грунте энергия нейтрино в каждом индивидуальном событии не может быть восстановлена точно. Однако, при достаточно большой статистике зарегистрированных событий, энергетический спектр потока мюонных нейтрино может быть восстановлен по результатам реконструкции энергии мюонов. Исследование природных потоков электронных и τ -нейтрино, составляющих примерно две трети от полного потока, в экспериментах на нейтринных телескопах возможно лишь посредством регистрации вторичных ливней, генерируемых в водной мишени. Адронные ливни образуются во взаимодействиях всех типов нейтрино с ядрами по каналам заряженных и нейтральных токов. Кроме того, в случае CC -взаимодействия электронных и τ -нейтрино энергия электрона переходит в энергию электромагнитного ливня, а существенная доля энергии τ -лептона в результате его распада передается в адронный либо электромагнитный ливень. Таким образом, достижение высокой точности восстановления энергии и направления ливней является неременным условием эффективной регистрации природных потоков нейтрино всех типов.

Излучение Вавилова-Черенкова заряженных частиц в прозрачных средах. Заряженная частица, движущаяся в преломляющей свет среде со скоростью, превышающей скорость света в среде, является источником черенковского излучения [20, 21]. Спектральное распределение черенковских

фотонов, излучаемых с единицы длины траектории частицы с единичным зарядом, определяется следующим выражением:

$$\frac{dn_c}{d\lambda} = 2\pi\alpha \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \frac{1}{\lambda^2}, \quad (1.2.4)$$

где λ – длина волны фотона в сантиметрах, $\alpha \approx \frac{1}{137}$ – постоянная тонкой структуры, $n(\lambda)$ – фазовый показатель преломления света в среде, $\beta = v/c$ – скорость частицы относительно скорости света в вакууме. Важным свойством процесса черенковского излучения, которое во многом определяет эффективность глубоководного метода регистрации частиц, является испускание черенковских фотонов в каждый момент времени из точки на траектории, в которой находится частица, строго под фиксированным углом θ_c относительно направления движения частицы. Значение черенковского угла θ_c определяемого из выражения $\cos \theta_c = 1/(\beta n)$ и составляет примерно 42° для воды и льда. Абсолютное значение скорости черенковских фотонов $v_c(\lambda)$ определяется групповой скоростью распространения света в среде:

$$v_c = \frac{c}{n_g(\lambda)}, \quad n_g(\lambda) = n(\lambda) - \lambda \frac{dn}{d\lambda}. \quad (1.2.5)$$

Рабочим диапазоном длин волн фотонов, детектируемых в глубоководных экспериментах, является интервал от 350 нм до 600 нм. Нижняя граница этого интервала обусловлена поглощением света стеклом фотодетекторов, а верхняя – увеличением показателя поглощения света в воде и во льду, а также уменьшением интенсивности черенковского излучения и понижением квантовой чувствительности электронных фотоумножителей с ростом длины волны фотонов. Групповая скорость распространения света в воде и во льду растет с ростом длины волны фотонов, что приводит к размытию светового сигнала черенковского излучения во времени.

Мюоны и ливни высоких энергий с энергией от сотен ГэВ и выше представляют собой два разных типа источников черенковского излучения

высокой интенсивности регистрируемых в нейтринных телескопах. Черенковское излучение электромагнитных и адронных ливней формируется фотонами, испущенными заряженными частицами ливня (в основном, электронами и позитронами) и определяется их пространственным, угловым и временным распределением. Поперечный размер электромагнитного ливня характеризуется *Мольеровским радиусом* (для воды порядка 9 см) и практически не влияет на отклик фотодетекторов нейтринных телескопов.

Угловое распределение электронной компоненты ливня слабо меняется вдоль оси ливня в окрестности максимума каскадной кривой, из которой излучается подавляющая доля черенковских фотонов, и для ливней с энергией выше 100 ГэВ может быть описано с удовлетворительной точностью единой функцией $\Psi_e(\theta)$, не зависящей от пространственных координат. Распределение электронной компоненты ливня может быть представлено в следующем виде:

$$N_e(x, \rho, \theta, t) \cong N_e(x) \Psi_e(\theta) \delta(t - x/c), \quad (1.2.6)$$

где c - скорость света в вакууме. Число черенковских фотонов $N_c(x, \theta, t) dx d\vec{\Omega} dt$, испущенных с интервала длины dx в окрестности x в элементе телесного угла $d\vec{\Omega}$, пропорционально суммарной длине траекторий заряженных частиц dl_e на интервале dx . Так как подавляющая доля частиц ливня движется вдоль его оси, то $dl_e \approx N_e(x) dx$. При $E_{sh} > 100$ ГэВ угловое распределение черенковских фотонов практически не зависит от энергии ливня. Характерное угловое распределение черенковских фотонов, просуммированное по траекториям всех заряженных частиц ливня $\Psi_c(\theta)$, представлено на рисунке 1.2.1 [22].

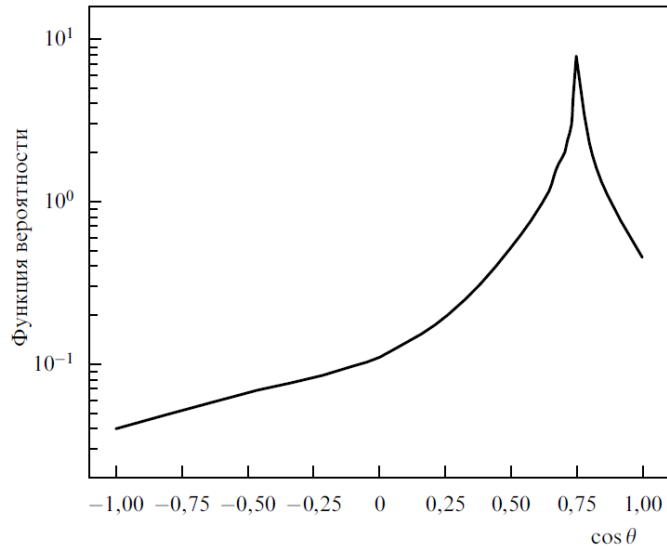


Рис. 1.2.1. Суммарное по всем траекториям e^\pm угловое распределение черенковского излучения от электромагнитных ливней ($E_{sh} > 100$ ГэВ).

Угловые распределения черенковских фотонов, испущенных с разных участков оси ливня в окрестности максимума каскадной кривой, незначительно отличаются от суммарного распределения $\Psi_c(\theta)$ [23], что позволяет разделить угловые и пространственные переменные и представить N_c в следующем виде:

$$N_c(x, \theta, t) \cong N_e(x)n_c\Psi_c(\theta)\delta(t - x/c), \quad (1.2.7)$$

где n_c - линейная плотность черенковского излучения релятивистских частиц (для воды и льда $n_c \approx 230 - 240$ фотонов/см в интервале длин волн 350 - 600 нм).

При моделировании отклика нейтринных телескопов на черенковское излучение ливней можно использовать аналитическую аппроксимацию продольного распределения заряженных частиц в электромагнитных и адронных ливнях [24]:

$$N_e(X) = \left(\frac{E_{sh}}{E_c}\right)^S S^{-1.5X} \exp(-2.49S + 0.5(S - 1)X + 0.025), \quad (1.2.8)$$

$$S = \frac{3X}{X + 2 \ln(E_{sh}/E_c) - 2.4}, \quad E_c = 72 \text{ MeV},$$

где $X=x/x_0$, $x_0=36.1$ см – радиационная длина для воды.

Развитие электромагнитного ливня определяется сечением тормозного излучения электронов и сечением образования e^+e^- пар фотонами. Как было впервые отмечено Ландау и Померанчуком и затем обосновано в рамках квантово-механического подхода Мигдалом [25], при достаточно больших энергиях электронов и фотонов сечения тормозного излучения и образования e^+e^- -пар в плотной среде могут быть подавлены в $E^{-1/2}$ раз за счет коллективного влияния атомов среды (LPM-эффект). Энергия, выше которой LPM-эффект становится существенным для воды, составляет примерно $E_{LPM}=2,2 \times 10^3$ ТэВ [26]. Для энергий выше E_{LPM} наблюдается увеличение продольного размера ливня. LPM-эффект практически не влияет на суммарную длину траекторий частиц ливня, которая остается пропорциональной его энергии. Распределение частиц в области максимума ливня существенно шире, чем в случае, когда LPM-эффект не учитывается, но число частиц в максимуме уменьшается. Отличие в форме продольного распределения $N_e(x)$ от ожидаемого в случае отсутствия LPM-эффекта становится существенным, начиная с энергии ~ 2 ПэВ. Выше этой энергии размер ливня растет с ростом энергии пропорционально $E_{sh}^{1/3}$. Влияние LPM-эффекта на развитие адронных ливней, образованных в нейтринных взаимодействиях, становится существенным лишь при $E_{sh} > 1$ ЕэВ [27].

Полное число черенковских фотонов от электромагнитного или адронного ливня пропорционально суммарной длине траекторий заряженных частиц и, соответственно, энергии ливня:

$$N_c^{tot} = n_c L_c = B E_{sh} (\text{ГэВ}). \quad (1.2.9)$$

В случае электромагнитного ливня коэффициент пропорциональности равен: $B = (1,04 \div 1,16) \times 10^5$ фотонов/ГэВ [28].

Световой поток, испускаемый при прохождении мюона в среде, включает в себя черенковское излучение, инициируемое электрическим

зарядом мюона, а также, черенковское излучение δ -электронов, рождающихся при ионизации атомов среды мюоном, и черенковское излучение ливней, образующихся в результате рождения e^+e^- пар, либо тормозного и фото-ядерного взаимодействий мюона со средой. Область энергий мюонов, доступная для исследования с помощью нейтринных телескопов, простирается от десятков ГэВ до ультравысоких энергий. Световое поле, инициируемое мюоном в среде, можно разделить на две составляющие. Первая составляющая излучается непрерывно с постоянной линейной плотностью по мере движения мюона вдоль его траектории. Линейная плотность и угловое распределение фотонов в этом источнике обусловлены черенковскими фотонами собственно мюона. Вторая составляющая формируется локальными (в грубом приближении, точечными) источниками на траектории мюона и описывает черенковское излучение ливней, образующихся в результате рождения e^+e^- -пар, а также, в результате тормозного и фотоядерного взаимодействий мюона.

1.3. История развития и современное состояние проектов нейтринных телескопов

В середине 70-х годов прошлого века велось активное обсуждение проблем астрофизики, физики космических лучей и физики элементарных частиц, которые могли бы быть исследованы с помощью глубоководных нейтринных телескопов, в частности, глубоководного нейтринного телескопа DUMAND (Deep Underwater Muon and Neutrino Detector) в Тихом океане у Гавайских островов [29]. В проекте DUMAND предполагалось размещение пространственной решетки фотоэлектронных умножителей, размещенных в стеклянных глубоководных корпусах, в открытом водном объеме размером порядка кубического километра. Наиболее существенным результатом, достигнутым в ходе работ по проекту DUMAND, явилось проведение натурных испытаний гирлянды (Sort Prototype String - SPS), содержащей семь оптических модулей. Были проведены измерения интенсивности потока

мюонов в зависимости от глубины и получен предел на природный поток астрофизических нейтрино. После первых успешных испытаний глубоководной аппаратуры в 1988 году был подготовлен проект DUMAND-II [30], согласно которому глубоководный нейтринный телескоп должен был состоять из 216 оптических модулей (фотодетекторов на основе фотоэлектронных умножителей), расположенных на 8 гирляндах длиной 230 метров каждая. Установка должна была располагаться в 30 км от береговой линии одного из Гавайских островов (Big Island) на глубине 4.8 км. В декабре 1993 года была установлена первая гирлянда DUMAND-II. Однако, из-за нарушения герметичности глубоководных корпусов испытания гирлянды оптических модулей закончились неудачно. Работы по проекту DUMAND были прекращены в 1995 году.

Несмотря на неудачу DUMAND, этот проект дал начало развитию первого поколения нейтринных телескопов: NT200 [31, 32], AMANDA [33, 34], ANTARES [35, 36], NESTOR [37, 38, 39] и NEMO [40, 41].

Нейтринные телескопы первого поколения

Первым нейтринным телескопом, способным регистрировать нейтринные события, стала установка NT200, расположенная в оз. Байкал на глубине ~1,1 км в 3,6 км от берега. Первая гирлянда телескопа была установлена в 1984 году, в 1993 году была введена в эксплуатацию первая очередь телескопа (НТ-36), включившая в свой состав 36 оптических модулей (ОМ). На этой установке были впервые зарегистрированы сигналы от атмосферных нейтрино в открытом водном объеме. Полномасштабные эксперименты на Байкальском телескопе были начаты в 1998 году, когда был создан детектор NT200 [31,32], состоящий из 192 оптических модулей: 8 гирлянд с 24 ОМ на каждой. Опыт создания и эксплуатации установки NT200 стал основой для разработки нейтринного телескопа второго поколения в оз.

Байкал: Baikal-GVD. Подробное описание установки NT200 представлено в Главе 2.

Работы по реализации проекта AMANDA (США, Германия, Швеция) были начаты в начале 90-х годов на станции Амундсен – Скотт, Южный полюс [33, 34]. В 1996 году была осуществлена постановка 86-ти оптических модулей, размещенных на 4-х гирляндах на глубине 1.5 – 1.9 км. В последующие годы осуществлялось планомерное развертывание детектора. В феврале 2000 года детектор AMANDA был введен в эксплуатацию в проектной конфигурации: 677 оптических модулей, расположенных на 19 вертикальных гирляндах, развернутых на глубинах 1300 – 2400 м, в которой успешно проработал до 2010 года. На рисунке 1.3.1 представлен общий вид нейтринного телескопа AMANDA и фотография оптического модуля, а также показана скважина во льду для развертывания гирлянды.

В установке AMANDA были использованы фотоэлектронные умножители HAMAMATSU R5912-2 с полусферическим фотокатодом диаметром 8” и квантовой эффективностью ~25%. Аналоговые сигналы с анодов ФЭУ передавались на поверхность по кабелям длиной ~2 км.

Следует обратить внимание на методику развертывания телескопа. Для антарктических экспериментов гирлянды ОМ устанавливаются в скважинах (см. рисунок 1.3.1), которые “бурятся” при помощи горячей воды (~90 °С) под высоким давлением. Средний диаметр отверстия ~50 см по всей глубине с незначительными изменениями, связанными с температурным профилем льда. Развертывание гирлянды производится сразу после окончания бурения, до того, как диаметр отверстия начинает сжиматься из-за обмораживания. Каждый ОМ подключается к несущему кабелю и испытывается “на месте” во время развертывания. Монтаж ОМ на кабель непосредственно в процессе развертывания требует использования разъемных кабельных соединителей (глубоководных разъемов). Аналогичная методика монтажа глубоководных

модулей используется и в Байкальском нейтринном телескопе, развертывание которого производится со льда озера.

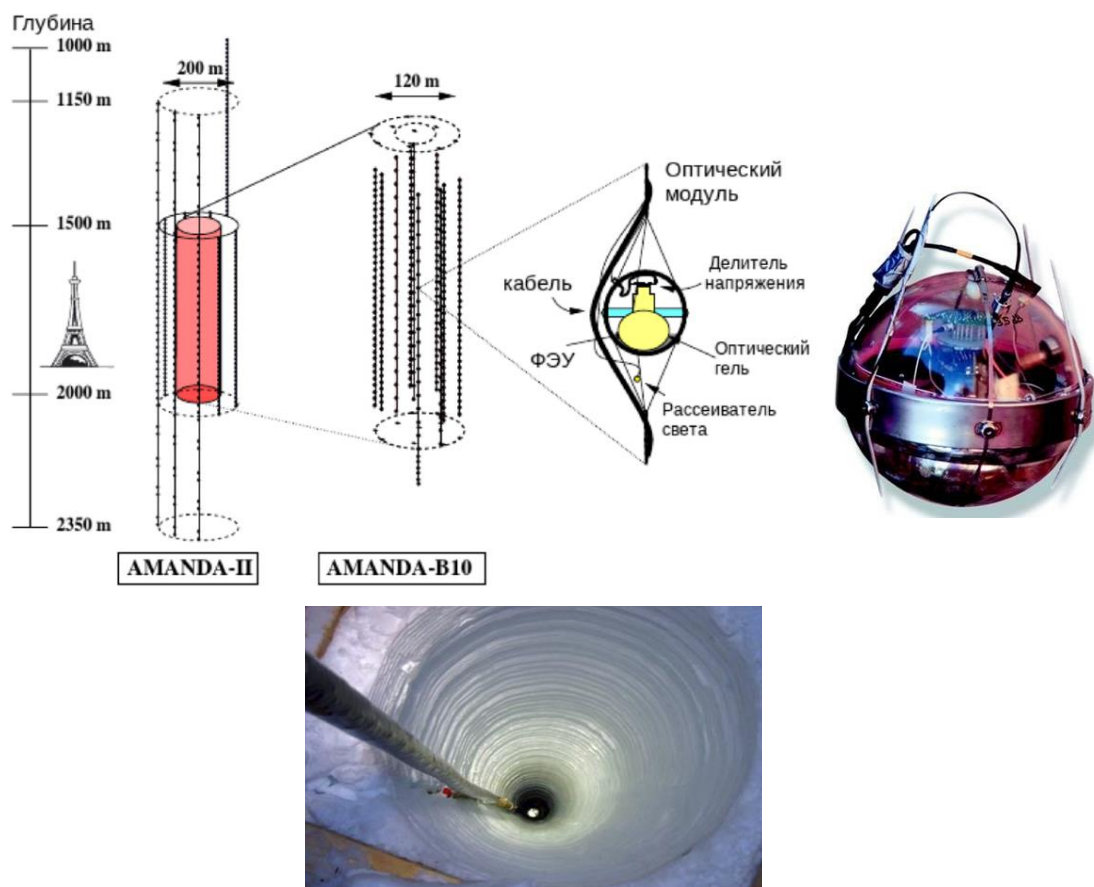


Рис. 1.3.1. Нейтринный телескоп AMANDA, фотография оптического модуля и вид скважины для развертывания гирлянды.

Коллаборацией ANTARES (Франция, Англия, Голландия, Россия, Италия) был создан глубоководный черенковский нейтринный телескоп в Тулонском заливе Средиземного моря [35, 36], который успешно функционирует и в настоящее время. Вплоть до 2017 года (ввод в эксплуатацию первых двух полномасштабных кластеров Baikal-GVD) он являлся крупнейшим нейтринным телескопом Северного полушария.

Телескоп расположен на расстоянии 25 км от берега на глубине около 2400 м и содержит 900 фотоэлектронных умножителей, сгруппированных в триплеты и размещенных на 12-ти гирляндах. Каждая гирлянда состоит из 25 “этажей”, на каждом из которых размещен триплет ФЭУ (см. рисунок 1.3.2). Расстояние между “этажами” 14.5 метров, расстояния между гирляндами – 70

метров, инструментальный объем $\sim 0.015 \text{ км}^3$. Первая гирлянда телескопа была развернута в феврале 2006 года, а в марте 2008 нейтринный телескоп ANTARES приступил к набору данных в проектной конфигурации.

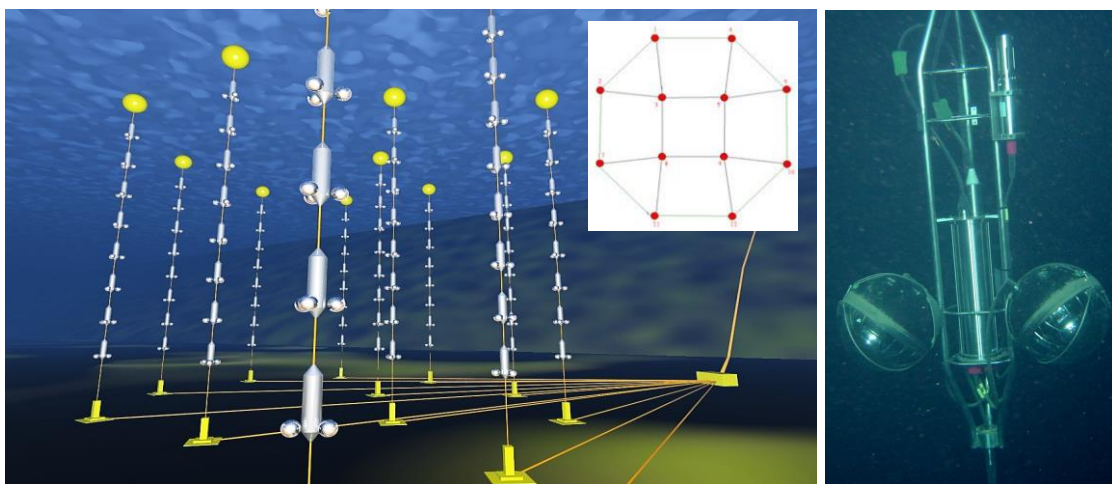


Рис. 1.3.2. Нейтринный телескоп ANTARES. размещение гирлянд телескопа и фотография триплета оптических модулей установки.

Оптический модуль установки ANTARES разработан на базе 14-диодного 10-дюймового ФЭУ HAMAMATSU R7081-20. Значительное удаление от берега накладывает жесткие ограничения на энергопотребление установки, поэтому для электропитания ФЭУ используется активный делитель напряжения. Каждый ОМ оснащен светодиодной системой калибровки.

Система сбора данных ANTARES обеспечивает передачу информации о времени и амплитуде сигналов, зарегистрированных ФЭУ (порог $\sim 1/3$ фотоэлектронного импульса), в береговой центр сбора данных. Временная синхронизация каналов осуществляется по сигналам генератора опорной частоты, поступающим с берега. Для временной калибровки каналов установки используются светодиодные и лазерный источник света. Акустическая система позиционирования положения гирлянд обеспечивает точность локализации положения оптических модулей $\sim 10 \text{ см}$. С учетом всех источников неопределенности измерения времени регистрации сигналов угловое разрешение нейтринного телескопа ANTARES составляет величину меньшую $0,5^\circ$ (см. рисунок 1.3.3). На рисунке 1.3.3 также представлен

пример восстановленного углового распределения мюонных событий, зарегистрированных установкой ANTARES. Набор данных содержит 168 кандидатов на нейтринные события, зарегистрированные за 167 дней живого времени работы установки.

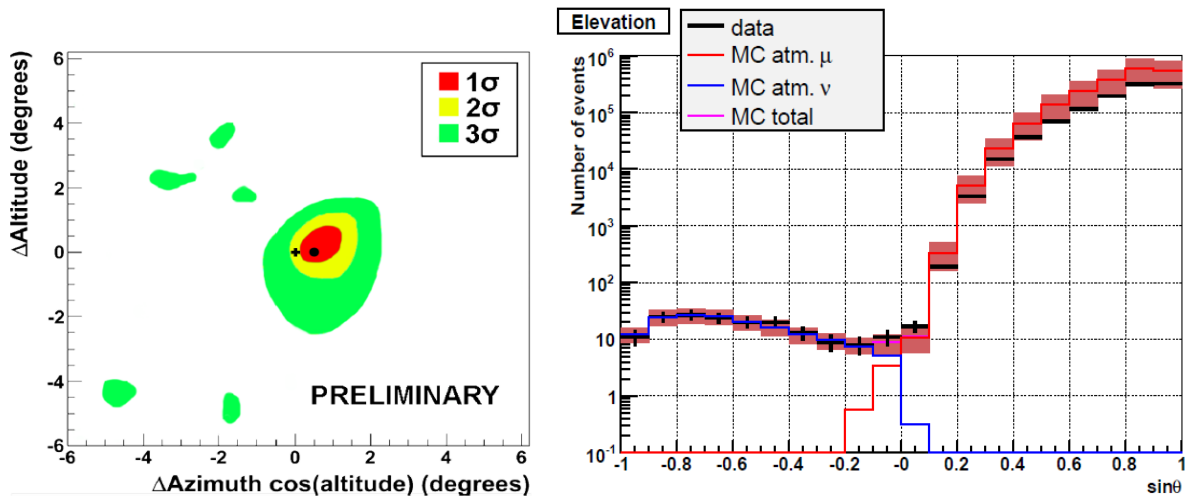


Рис. 1.3.3. *Контурная диаграмма тени луны, полученная по мюонам (слева) и пример углового распределение событий, зарегистрированных установкой ANTARES за 167 дней живого времени работы установки. Красная и синяя кривые – результаты моделирования потока атмосферных мюонов и нейтрино, соответственно.*

Коллаборация NESTOR (Греция) [37–39] ведет работы по созданию нейтринного телескопа в Средиземном море с начала 90-х годов прошлого века. Телескоп планируется разместить у берегов Юго-Западной части Пелопоннеса на глубине ~ 4000 м. Следует отметить, что гидрооптические и гидрологические свойства среды и уровень фона, обусловленного процессами биолюминесценции, в месте расположения телескопа наиболее адекватны требованиям, предъявляемым к водной среде при создании нейтринного телескопа в Средиземном море. Основной конструкционной единицей установки NESTOR является т. н. башня (Tower) высотой ~ 400 метров, в состав которой входит 144 оптических модуля, расположенных на 12 “этажах”. Данные, получаемые от ОМ, представляют собой временные кадры, содержащие информацию о форме импульса фотоэлектронных

умножителей. Передача данных на берег производится по 31-километровому электро-оптическому кабелю, проложенному по дну моря в 2000 году.

Оптический модуль NESTOR разработан на базе 15" ФЭУ НАМАМАТСУ R2018-03. Характеристики ФЭУ R2018-03 была значительно улучшена по сравнению с предыдущей версией (R2018), которая была использована в проекте DUMAND. В 2003 году был установлен первый прототип одного этажа будущего детектора (12 ФЭУ). После месяца эксплуатации набор данных был прерван в связи с возникшими неполадками в системе электропитания. В октябре 2015 года в 16 км от Пилоса на глубине 3000 м был установлен второй прототип одного этажа “башни” установки NESTOR с 8 оптическими модулями с ФЭУ НАМАМАТСУ R8055 (диаметр фотокатода 13”). Установка проработала на автономном электропитании около 4-х месяцев. В апреле 2017 года прототип был успешно поднят на поверхность (см. рисунок 1.3.4). В настоящее время проводится обработка накопленной физической информации.

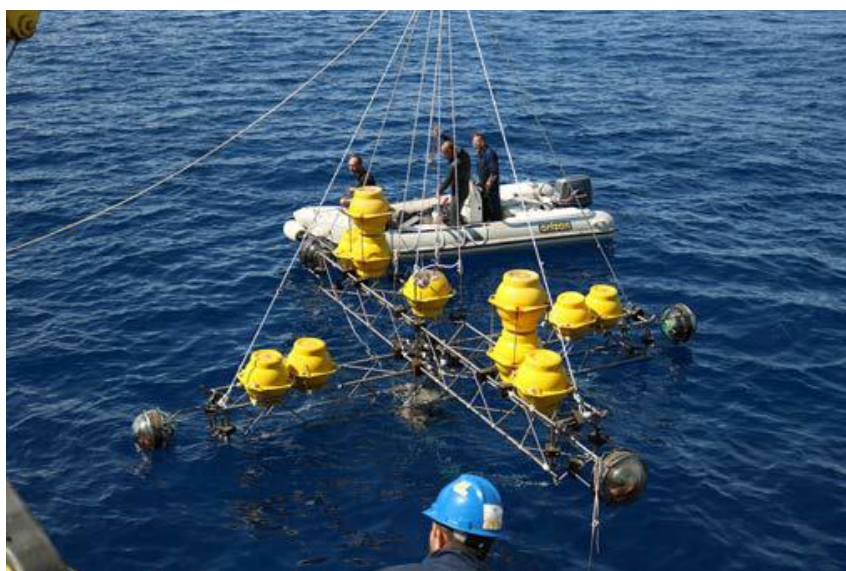


Рис. 1.3.4. Автономный прототип одного этажа установки NESTOR, поднятый на поверхность в апреле 2017 г.

Коллаборация NEMO (Италия) [40, 41] в 1998 году начала активные исследования района Средиземного моря вблизи Сицилии с целью развертывания там детектора, который послужит прототипом будущего

кубокилометрового общеевропейского нейтринного телескопа. В декабре 2006 года была осуществлена постройка и начались натурные испытания прототипа одной башни будущего детектора, содержащей 16 оптических модулей. Однако после месяца работы прототип потерял плавучесть и “лег” на дно. В марте 2013 года башня NEMO была успешно развернута в районе Капо Пассеро, Сицилия, на глубине 3500 м. Каждый этаж башни представляет собой металлическую конструкцию длиной 8 м, на концах которой закреплены по два оптических модуля: вертикальный (фотокаатод направлен вниз) и горизонтальный (см. рисунок 1.3.5). Этажи располагаются на расстоянии 40 метров друг от друга. В центре каждого этажа располагается коммуникационный модуль, обеспечивающий передачу данных на берег.

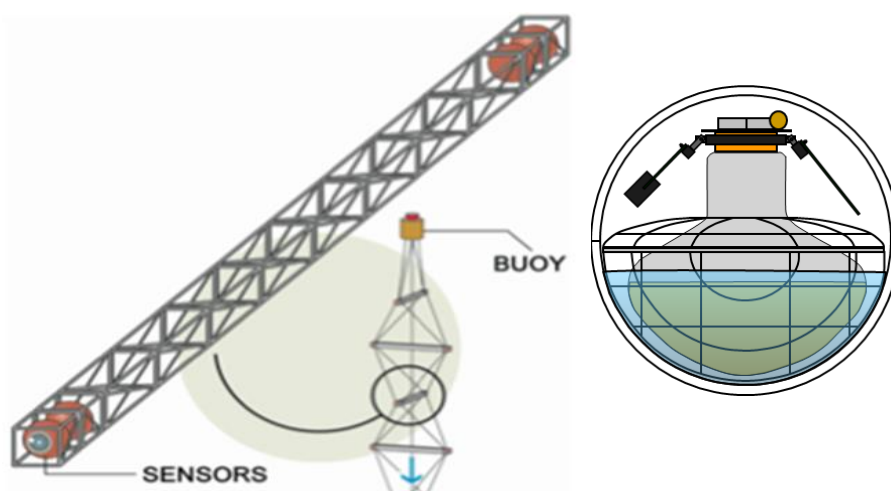


Рис. 1.3.5. Расположение оптических модулей на одном “этаже” нейтринного телескопа NEMO (слева) и схема оптического модуля (справа).

Оптический модуль установки NEMO разработан на основе ФЭУ НАМАМАТСУ R7081 (диаметр полусферического фотокаатода 10”, квантовая чувствительность ~25%).

Нейтринные телескопы второго поколения

Успешная эксплуатация нейтринных телескопов первого поколения (HT200, AMANDA и ANTARES) с одной стороны, и отсутствие

зарегистрированных нейтрино астрофизической природы на этих установках с другой, инициировало разработку и создание нейтринных телескопов второго поколения, с размерами масштаба кубического километра: KM3NeT, IceCube, Baikal-GVD.

Нейтринный телескоп KM3NeT [42-44] будет представлять собой систему телескопов с суммарным инструментальным объемом несколько кубических километров. Система телескопов будет расположена на трёх площадках Средиземного моря: KM3NeT-Fr у берега Тулон; KM3NeT-It у берега Сицилии; KM3NeT-Gr у берега Пилос. Данные будут передаваться непосредственно от мест установки в центр обработки данных в Лионе. Штаб-квартира KM3NeT с проектным офисом расположена в Амстердаме (KM3NeT-HQ).

Проект KM3NeT является результатом десятилетних научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, выполненных коллаборациями NEMO, NESTOR и ANTARES. Консорциум KM3NeT сформирован в 2006 г., 29 января 2013 года сформирована группа для реализации первого этапа развертывания инфраструктуры KM3NeT. 27 апреля 2015 г. был успешно установлен первый донный сетевой узел на месте KM3NeT-Fr. Во время этой операции донный узел был подключен к береговому 40-километровому электро-оптическому кабелю, который был установлен в декабре 2014 г. В настоящее время в рамках проекта KM3NeT предполагается создание нейтринных детекторов двух типов: ARCA и ORCA (Astroparticle and Oscillation Research with Cosmics in the Abyss) [45]. Установки будут различаться плотностью размещения оптических модулей. Основной структурной единицей обеих установок является гирлянда, состоящая из 18 ОМ (см. рисунок 1.3.6). Расстояния между ОМ вдоль оси гирлянды составляют 36 м (ARCA) и 9 м (ORCA), а расстояния между гирляндами 90 м и 20 м соответственно. ARCA предназначена для исследования астрофизических нейтрино, ORCA (энергетический порог ~ 1

ГэВ) - для определения иерархии массовых состояний нейтрино на основе анализа данных регистрации атмосферных нейтрино.

Для установки KM3NeT был разработан глубоководный оптический модуль, в состав которого входит 31 фотоэлектронный умножитель HAMAMATSU R12199-02 с диаметром фотокатода около 8 см [46, 47]. Конструкция оптических модулей с несколькими ФЭУ, размещенными в одном корпусе, успешно применялась и ранее в подводных экспериментах (см. например [48]). Основными преимуществами оптического модуля KM3NeT по сравнению с ОМ на основе одного ФЭУ являются большая суммарная площадь фотокатодов ФЭУ, возможность подавления шумов с использованием схемы совпадений сигналов, чувствительность ОМ к направлению на источник излучения. Сигналы, регистрируемые ФЭУ, преобразуются в цифровой код электроникой ОМ (измеряется время прихода сигналов и их длительность для набора фиксированных порогов) и передаются в береговой центр сбора данных по оптическому каналу со спектральным уплотнением оптической связи. Временная синхронизация работы каналов организована на основе системы "White Rabbit" [49].

Интерес представляет методика подготовки и развертывания гирлянд KM3NeT. Гирлянды с оптическими модулями полностью собираются в лабораторных условиях. Такой подход позволяет использовать подключение оптоволоконных линий к каждому ОМ через отверстия в стеклянных корпусах, используя специальные "проходники". Собранные гирлянды KM3NeT специальным образом упаковываются (см. рисунок 1.3.6) и в таком виде опускаются на дно на глубину ~ 3 км с корабля (плавучей платформы). Развертывание гирлянд в вертикальное положение осуществляется под воздействием положительной плавучести буйев и ОМ. Первые натурные испытания опытных образцов оптических модулей KM3NeT были проведены в 2014 году [50], а испытания гирлянд в 2016 году [51].

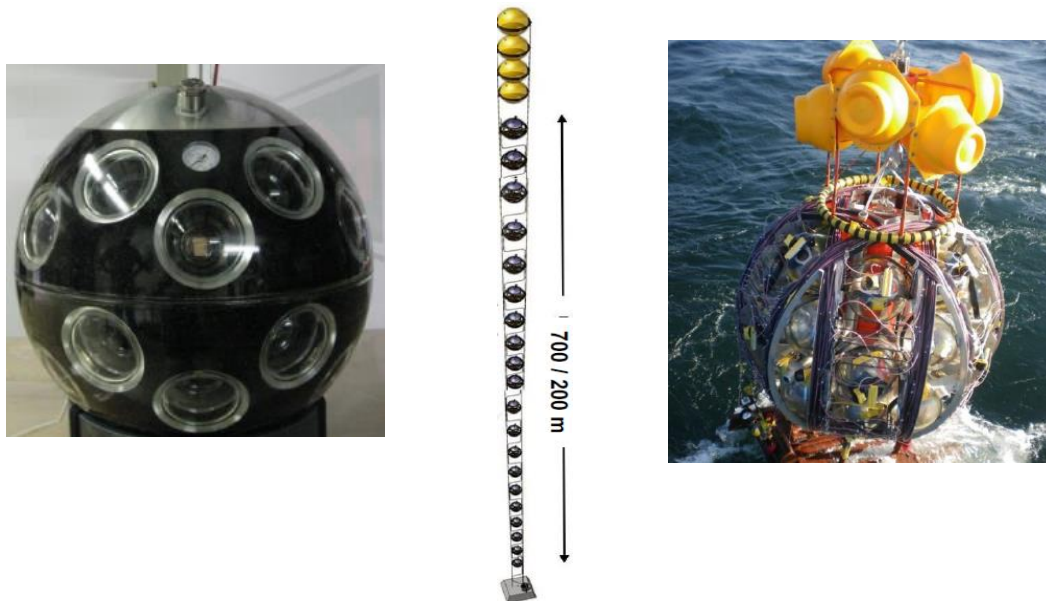


Рис. 1.3.6. Оптический модуль установки KM3NeT (слева), гирлянда оптических модулей, установленная на донном якорю (в центре) и гирлянда, подготовленная для установки с плавучей платформы (справа).

Лидирующие позиции в области нейтринной астрофизики высоких энергий в настоящее время занимает установка IceCube [52], которая была развернута на Южном полюсе рядом с нейтринным телескопом AMANDA. Первая гирлянда IceCube была установлена зимой 2005 года [53]. В последующие годы темпы монтажа установки последовательно нарастали, и в феврале 2011 года детектор был развернут и запущен в эксплуатацию. Общий вид установки IceCube представлен на рисунке 1.3.7.

IceCube состоит из 5160 цифровых ОМ [54], расположенных на глубине 1450 – 2450 м на 86 гирляндах. Гирлянды установлены в виде гексагональной сетки с шагом 125 метров, покрывающей площадь $\sim 1 \text{ км}^2$. Каждая из гирлянд содержит 60 оптических модулей, расположенных на расстояниях 17 метров вдоль оси гирлянды. В качестве фотодетекторов оптических модулей используются ФЭУ НАМАМАТСУ R7081-02 с полусферическим фотокатодом с диаметром 10'' (см. рисунок 1.3.7). 480 дополнительных ОМ формируют компактную структуру в центре установки DeepCore (восемь гирлянд удаленных друг от друга на $\sim 70 \text{ м}$, расстояния между ОМ по

вертикали 7 м). В этих ОМ используется ФЭУ НАМАМАТСУ R7081-HQE с повышенной квантовой эффективностью фотокатода. Еще 324 ОМ заморожены в баки диаметром 1,8 м на поверхности льда для регистрации атмосферных ливней (установка IceTop). В одном баке размещается два ОМ. Отношение их коэффициентов усиления составляет 1:50, что обеспечивает величину динамического диапазона регистрирующей системы от одного до 10^5 ф.э.

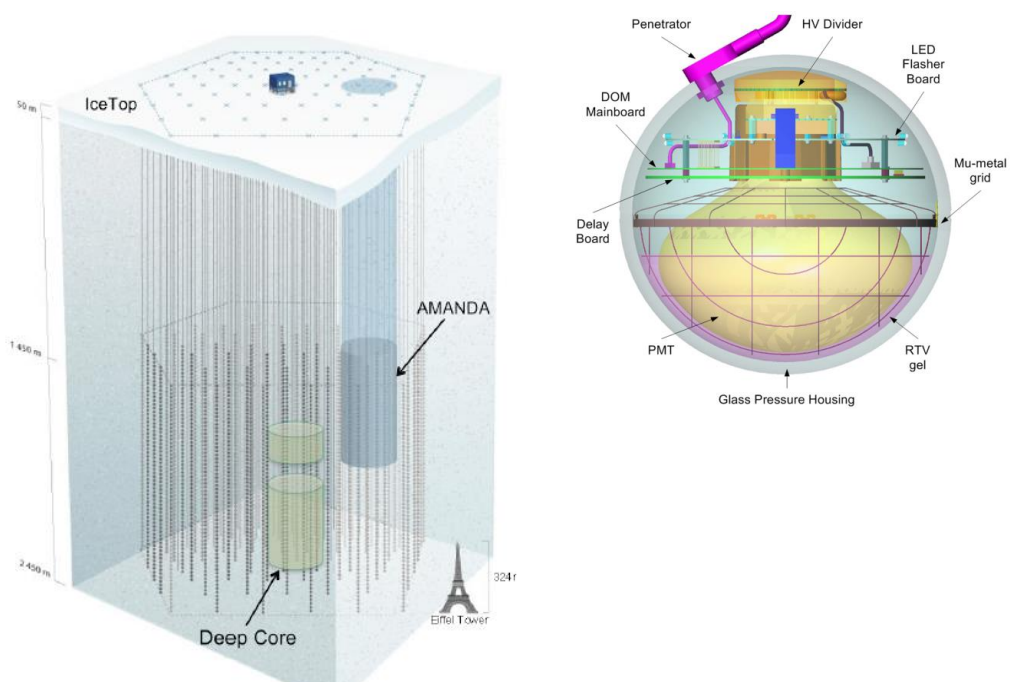


Рис. 1.3.7. Общий вид нейтринного телескопа IceCube и схема оптического модуля установки.

Преобразование аналоговых сигналов ФЭУ в цифровую форму осуществляется электроникой оптического модуля. Для этого используется массив коммутируемых конденсаторов (switched-capacitor array), который позволяет оцифровывать сигналы с частотой 300 МГц во временном окне $\sim 0,4$ мкс после регистрации триггерного сигнала, и модуль 10-битных АЦП с частотой дискретизации 40 МГц, работающий во временном окне 6,4 мкс [54].

При температурах эксплуатации установки IceCube ($-20 \dots -40$ °С) термоэмиссия фотокатодов значительно подавлена, и в шумах ФЭУ начинает доминировать вклад от радиоактивных распадов в стеклянной колбе.

Поэтому по требованиям IceCube колбы ФЭУ были изготовлены из специального стекла с низкой радиоактивностью. Это обуславливает низкий уровень шумов ФЭУ (до 500 Гц). Такой уровень шума позволит IceCube обнаруживать нейтрино низких энергий (единицы МэВ) от сверхновых по увеличению коллективной скорости счета фотонов для всей установки.

В настоящее время в связи с планируемым увеличением объема нейтринного телескопа IceCube до масштабов $\sim 10 \text{ км}^3$ ведутся работы по модернизации оптического модуля [55, 56] с целью увеличения его чувствительности. Рассматриваются варианты оптических модулей с 41 ФЭУ диаметром 3" и двумя ФЭУ диаметром 10" в одном корпусе. Кроме того, активно исследуется возможность создания ОМ, в котором используется *шифтер* (материал, переизлучающий черенковский свет в область длин, соответствующей большей чувствительности ФЭУ), нанесенный на корпус ОМ [57, 58]. Чувствительность одного такого ОМ должна быть эквивалента ~ 8 ОМ IceCube, используемым в настоящее время.

Ближайшие планы развития инфраструктуры нейтринного телескопа IceCube включают в себя также разработку проекта детектора нейтрино низких энергий с порогом регистрации мюонов порядка 1 ГэВ и эффективным объемом $\sim 10 \text{ Мт}$ (детектор PINGU – Precision IceCube Next-Generation Upgrade) за счет дальнейшего насыщения центральной части телескопа DeepCore дополнительными гирляндами фотодетекторов. Одной из основных задач, на решение которых нацелена установка PINGU, является определение иерархии массовых состояний нейтрино по результатам анализа энергетического и углового распределения мюонов от атмосферных нейтрино.

Наиболее ярким и значимым для дальнейшей судьбы развития нейтринной астрофизики представляется сегодня результат анализа данных эксперимента IceCube в задаче поиска нейтрино астрофизической природы [59, 60]. В качестве нейтринных событий отбирались каскады, образованные в результате взаимодействия нейтрино с энергией выше 30 ТэВ в выделенной

внутренней области телескопа с объемом порядка $0,4 \text{ км}^3$. В результате анализа данных, накопленных за три года с мая 2010 по май 2013 и соответствующих 988 дням “живого времени” установки, было выделено 37 таких событий, что соответствует превышению в $5,7\sigma$ над ожидаемым фоном от атмосферных мюонов и нейтрино. Восстановленные направления мюонных и ливневых событий согласуются с изотропным распределением первичных нейтрино. На рисунке 1.3.8 представлено распределение зарегистрированных событий по выделенной энергии в телескопе, ожидаемые распределения фоновых событий, и положение восстановленных направлений прихода нейтрино на небесной сфере в галактических координатах. К настоящему моменту времени (июнь 2017 года) живое время экспозиции установки IceCube составило 2078 дней. За это время было зарегистрировано 82 события – кандидата на нейтрино астрофизической природы. Результат, полученный в эксперименте IceCube, является важнейшей вехой в развитии исследований природных потоков нейтрино высоких энергий, так как он отвечает на вопрос о величине потока нейтрино астрофизической природы и определяет необходимый уровень чувствительности экспериментов при решении задач нейтринной астрофизики высоких энергий.

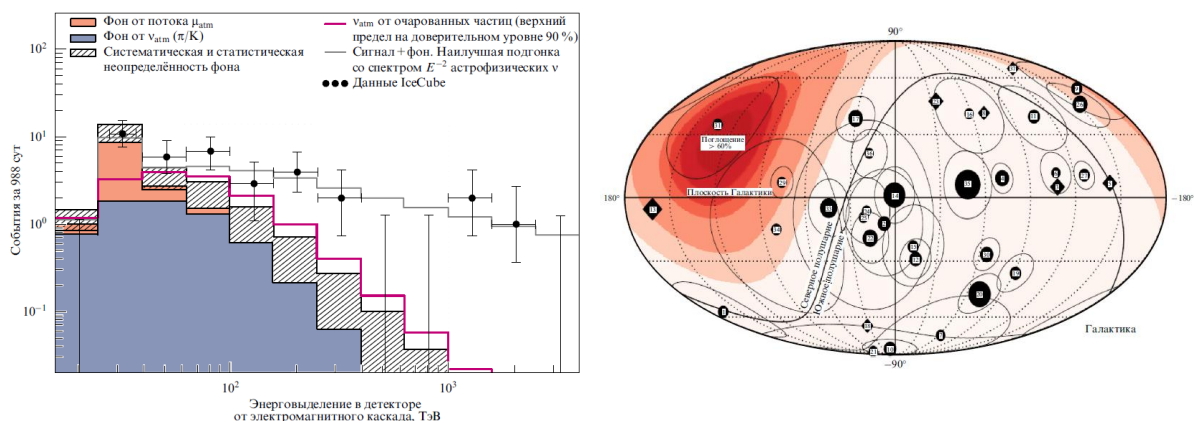


Рис. 1.3.8. Распределения по выделенной энергии экспериментальных событий и ожидаемые распределения от атмосферных мюонов и нейтрино (слева) и направления прихода нейтринных событий с энергией больше 30 ТэВ на небесной сфере в галактических координатах (справа).

Относительно малая статистика и недостаточная точность восстановления направлений ливневых событий в IceCube не позволяют сделать однозначный выбор между Галактической и внегалактической природой источников наблюдаемых нейтрино. С этой точки зрения ввод в эксплуатацию водных нейтринных телескопов Baikal-GVD и KM3NeT, имеющих существенно лучшую точность восстановления ливневых событий, позволит существенно продвинуться в решение данной проблемы.

Успешная работа детекторов первого поколения: NT200, AMANDA, ANTARES и крупнейшего на сегодняшний день кубокилометрового нейтринного телескопа IceCube привела научное сообщество к осознанию необходимости согласования своих последующих планов и к созданию с этой целью Глобальной нейтринной сети (GNN). GNN является первым этапом формирования консорциума “Глобальная нейтринная обсерватория” (GNO) с участием международных коллабораций ANTARES, Baikal, IceCube, KM3NeT. Развитие такого взаимодействия должно повысить уровень надежности и достоверности представляемых результатов, ускорить поиск необходимых технических решений, позволит вести поиск и изучение источников нейтрино высоких энергий на всей небесной сфере.

1.4. Сравнительные характеристики нейтринных телескопов

Конфигурация нейтринных телескопов, архитектура измерительных и коммуникационных систем, а также потенциальные возможности при решении физических задач обусловлены их местоположением, свойствами среды, степенью сложности инженерно-технических решений при создании и эксплуатации установки, затрат на создание и поддержку инфраструктуры, а также возможностью модификации конфигурации и увеличения светосилы телескопа.

Байкальский нейтринный телескоп Baikal-GVD и средиземноморский KM3NeT, расположенные в Северном полушарии, и детектор IceCube на Южном полюсе в силу их географического положения будут взаимно

дополнять друг друга и сформируют мировую сеть установок, нацеленных на поиск и исследование источников нейтрино высоких и сверхвысоких энергий на всей небесной сфере. Потребность по крайней мере в двух телескопах, расположенных в Южном и Северном полушариях, обусловлена их ограниченной угловой апертурой в широкой области энергий нейтрино. В области энергий ниже $\sim 10^2$ ТэВ из-за высокого уровня фоновых событий от атмосферных мюонов выделение нейтринных событий возможно лишь для нейтрино из-под горизонта. При энергиях выше нескольких сотен ТэВ фон от атмосферных мюонов становится приемлемым для регистрации нейтрино сверху, однако, для нейтрино таких энергий Земля становится не прозрачной и апертура телескопа оказывается ограниченной для событий снизу.

Детекторы, расположенные в Северном полушарии, обладают важным преимуществом - они способны вести практически непрерывное наблюдение центра Галактики (Baikal-GVD -18 часов и KM3NeT -15 часов в течение суток) и Галактической Плоскости, где сконцентрирована основная часть потенциальных галактических источников космических лучей (пульсары, остатки сверхновых, двойные системы и т.д.), включая массивную черную дыру Sgr A* в центре Галактики.

Существенным фактором при сравнительном анализе различных экспериментов в естественных средах являются оптические свойства среды - оптическая прозрачность, уровень собственного свечения (фон), а также агрессивность среды по отношению к конструкционным материалам. Основными оптическими параметрами, определяющими распространение черенковского излучения мюонов и ливней в естественных средах, являются показатель поглощения $k(\lambda)$, показатель рассеяния $\sigma(\lambda)$ и индикатриса рассеяния $\chi(\mu, \lambda)$, ($\mu = \cos\theta$, θ - угол рассеяния фотона). На рисунке 1.4.1 приводятся характерные спектральные зависимости оптических параметров среды в местах проведения глубоководных экспериментов на оз. Байкал, на Южном полюсе в Антарктиде и в Средиземном море.

Антарктический лед характеризуется сильной неоднородностью по глубине. Так, например, длина поглощения света во льду на глубинах от 1500 м до 2500 м меняется от 30 до 100 метров, длина рассеяния – от 0.4 до 4 метров. Это существенно затрудняет анализ экспериментального материала, полученного на установке. Кроме того, интенсивное рассеяние света в совокупности со слабым его поглощением в антарктическом льду приводит к быстрой “изотропизации” светового поля и, соответственно, к потере информации об ориентации источника черенковского излучения.

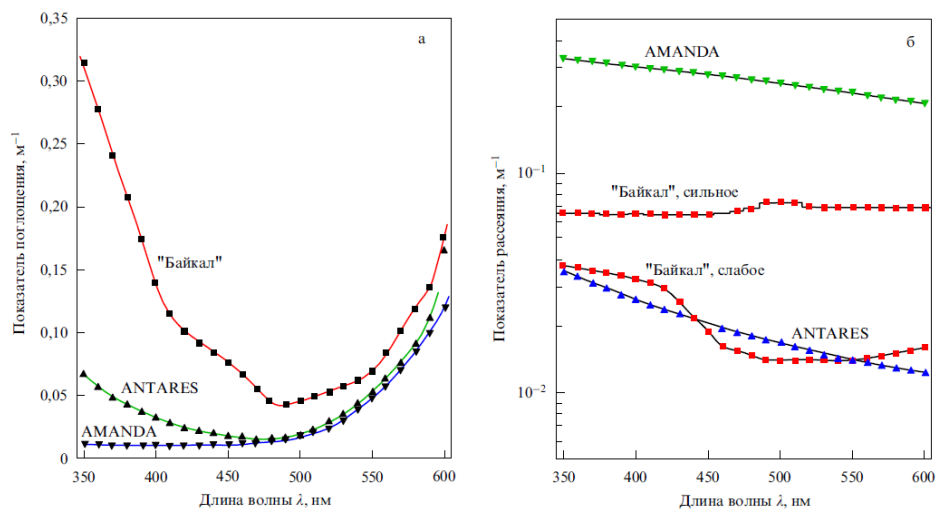


Рис.1.4.1. Спектральная зависимость показателей поглощения (а) и рассеяния (б) байкальской воды, антарктического льда (AMANDA) и воды Средиземного моря (ANTARES).

Оптические свойства глубинных вод Средиземного моря характеризуются длиной поглощения 50 – 70 м и длиной рассеяния 30 – 60 м. Для глубинных вод оз. Байкал характерными являются длина поглощения 22 – 25 м и длина рассеяния 30 – 50 м. Длина рассеяния света в байкальской и средиземноморской воде более чем на порядок превышает соответствующую величину в антарктическом льду. Благодаря этому глубоководные телескопы Baikal-GVD и KM3NeT будут обладать существенным преимуществом в задаче исследования диффузного потока нейтрино в диапазоне энергий $10^2 \dots 10^6$ ТэВ. Наряду с исследованием энергетического спектра на уровне чувствительности детектора IceCube, они будут способны вести

исследование глобальной и локальной угловой анизотропии диффузного потока нейтрино посредством регистрации ливней от нейтрино всех трех типов с последующим восстановлением ориентации оси ливня с точностью порядка нескольких градусов. Отметим, что точность восстановления оси ливня в IceCube не превышает 10 - 15 градусов.

С точки зрения природного фона, обусловленного собственным свечением среды, эксперимент IceCube обладает несомненным преимуществом по сравнению с глубоководными экспериментами. В антарктическом льду практически отсутствует собственное свечение среды. Кроме того, благодаря экстремально низким значениям температуры глубинного льда (примерно минус 50 градусов по Цельсию) темновой ток ФЭУ примерно на порядок ниже, чем в случае глубоководных экспериментов. В свою очередь с точки зрения фоновых условий детектор Baikal-GVD обладает преимуществом по сравнению с KM3NeT, так как в отличие от пресной воды оз. Байкал в морской воде Средиземного моря присутствует фон от распадов ^{40}K и существенно выше фон, обусловленный процессами биолюминесценции. Как показал опыт эксплуатации телескопа ANTARES, скорость счета каналов установки, обусловленных биолюминесценцией, может достигать значений до 1 МГц, что приводит к потере информативности полученных данных.

В заключение сравнения разных экспериментов с точки зрения преимуществ, обусловленных свойствами среды, отметим, что соленая вода Средиземного моря предъявляет существенно более жесткие требования, по сравнению с пресной байкальской водой и антарктическим льдом, к антикоррозийным свойствам конструкционных материалов элементов, узлов и несущих конструкций нейтринного телескопа. В таблице 1.4.1 представлены оптические и фоновые характеристики среды для различных мест дислокации нейтринных телескопов.

Таблица 1.4.1. Характеристики среды в местах размещения нейтринных телескопов

Характеристика	Оз. Байкал	Средиземное море	Антарктида
Длина поглощения	22 м	55 м	100 м
Длина рассеяния	30 – 50 м	~50 м	~3 м
Структура среды	Однородная	Однородная	Слоистая
Темп счета шумов оптического модуля	20 – 60 кГц	60 – 250 кГц	< 1 кГц
Основные источники шумов	Хеми-люминесценция	Биолюминесценция, ^{40}K	Темновой ток ФЭУ

Одним из наиболее важных факторов, определяющих реализуемость проектов крупномасштабных нейтринных телескопов, является создание и поддержка инфраструктуры и степень сложности технической реализации проекта. Проект IceCube использует инфраструктуру полярной антарктической станции Амундсен-Скотт. Поддержка жизнеспособности этой станции требует существенных финансовых затрат, связанных с ее трудной доступностью и экстремальными климатическими условиями на Южном полюсе. Технология развертывания телескопа основана на оригинальной технологии “протаивания” скважин глубиной до 2500 метров во льду с помощью специального оборудования. Для подготовки одной скважины требуется около 18 тонн топлива. “Вмораживание” оптических модулей телескопа в лед исключает возможность извлечения и ремонта научного оборудования и изменения конфигурации телескопа. Все эти факторы определяют высокую стоимость проекта.

В случае средиземноморского проекта KM3NeT создание береговой инфраструктуры не вызывает принципиальных трудностей. С другой стороны, развертывание и долговременная эксплуатация нейтринного телескопа на больших глубинах в соленой воде Средиземного моря

предъявляет повышенные требования к надежности электронных и коммуникационных систем и несущих конструкций телескопа и является сложной и дорогостоящей инженерно-технической задачей. Например, подключение коммуникационного кабеля, обеспечивающего передачу данных и энергопитание телескопа к системному модулю телескопа, установленному на дне моря, осуществляется с помощью специализированных подводных аппаратов, либо подводных роботов. В отличие от антарктического льда размещение телескопа в море позволяет обеспечить доступность определенной части вышедших из строя элементов и узлов телескопа. Гирлянды оптических модулей при необходимости могут быть отсоединены от донных якорей и эвакуированы для проведения ремонтных работ.

Проект телескопа Baikal-GVD предполагает использование при его создании и эксплуатации существующей инфраструктуры Байкальской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. Рельеф дна озера позволяет развертывание установки на расстоянии 4–6 км от берега, что существенно меньше характерных расстояний 25–150 км, обсуждаемых для средиземноморских проектов. Наличие в течение примерно двух месяцев (с середины февраля до середины апреля) устойчивого ледового покрова позволяет вести работы по развертыванию телескопа, а также ремонтные, профилактические и исследовательские работы непосредственно со льда, используя его как прочную и неподвижную монтажную платформу. Эта же специфика Байкальского проекта дает возможность реализовать модульную архитектуру телескопа Baikal-GVD, сохраняя тем самым возможность последующего наращивания его объема путем постановки дополнительных, функционально независимых кластеров. Кроме того, в байкальских условиях существует уникальная (и уже испытанная) возможность оперативного изменения конфигурации глубоководной установки путем перемещения гирлянд в новое положение непосредственно под водой без их предварительного подъема и демонтажа на поверхности.

Выводы к Главе 1.

Нейтринные телескопы представляет собой пространственную структуру фотодетекторов, размещенных в прозрачных естественных средах, регистрирующих продукты взаимодействия нейтрино (мюоны и каскадные ливни) по их черенковскому излучению. Нейтринные телескопы предназначены для решения широкого круга научных задач: исследование высокоэнергичных процессов в астрофизических объектах и во Вселенной в целом с помощью нейтрино высоких энергий, исследования фундаментальных физических проблем (в т. ч. поиск нейтрино, образующихся в результате аннигиляции или распада частиц темной материи), изучение космических лучей с помощью атмосферных мюонов, поиск “быстрых” и “медленных” монополей.

Успешная эксплуатация нейтринных телескопов первого поколения (HT200, AMANDA и ANTARES) инициировало разработку и создание нейтринных телескопов второго поколения, с размерами масштаба кубического километра. К наиболее значимым из введенных в эксплуатацию и проектируемых в настоящее время кубокилометровых нейтринных телескопов следует отнести IceCube, KM3NeT и Baikal-GVD. На установке IceCube в 2010 – 2013 гг. были впервые зарегистрированы “астрофизические” нейтрино высоких энергий, т.е. нейтрино, родившиеся за пределами солнечной системы. Регистрация этих нейтрино, ознаменовавшая рождение нейтринной астрономии, поставило на повестку дня необходимость создания нейтринных телескопов близкой мощности в Северном полушарии с тем, чтобы вести исследование источников нейтрино высоких энергий по всей небесной сфере. Нейтринный телескоп Baikal-GVD должен стать одной из ключевых установок будущей международной нейтринной обсерватории, в которую будут входить детекторы на Южном полюсе, в Средиземном море и на озере Байкал.

Глава 2. Этапы разработки проекта и общая концепция нейтринного телескопа Baikal-GVD

Разработка проекта нейтринного телескопа Baikal-GVD осуществлялась на основании опыта, накопленного при создании и эксплуатации установок NT200 и NT200+. Возможность проведения натуральных испытаний новой регистрирующей аппаратуры Baikal-GVD на действующей установке, используя инфраструктуру Байкальского нейтринной обсерватории ИЯИ РАН, явилась ключевым фактором, позволившим в сжатые сроки разработать базовые элементы будущего нейтринного телескопа. Ряд технических решений, разработанных для детектора NT200+, был применен и при проектировании Baikal-GVD. На основании проведенных натуральных исследований разработанной регистрирующей аппаратуры и математического моделирования была создана общая концепция нейтринного телескопа, разработана базовая конфигурация установки и проведены оценки ее основных параметров: эффективной площади и объема для регистрации мюонов и каскадных ливней, точности восстановления направления и энергии регистрируемых событий.

2.1. Байкальская нейтринная обсерватория

Местом проведения Байкальского нейтринного эксперимента является район акватории озера Байкал, примыкающий к 106-км Кругобайкальского участка Восточно-Сибирской железной дороги, где реализуется оптимальное сочетание гидрологических, гидрофизических и ландшафтных факторов, необходимых для создания и функционирования нейтринного телескопа. Географические координаты места расположения комплекса Байкальского нейтринного телескопа составляют 51°50' С.Ш., 104°20' В.Д. Данный район побережья оз. Байкал достаточно хорошо освоен и электрифицирован. Важным фактором является наличие достаточно развитой инфраструктуры в

этой части побережья озера, позволяющей, в частности, осуществлять транспортировку грузов и научного оборудования по железной дороге.

Глубина оз. Байкал в этом районе составляет 1300-1400 метров на расстояниях от трех километров от берега. Плоский рельеф дна озера на протяжении нескольких десятков километров обеспечивает принципиальную возможность развертывания детектирующих систем глубоководного телескопа в объеме более 10 кубических километров. Место расположения Байкальской нейтринной обсерватории (БНО) показано на рисунке 2.1.1.

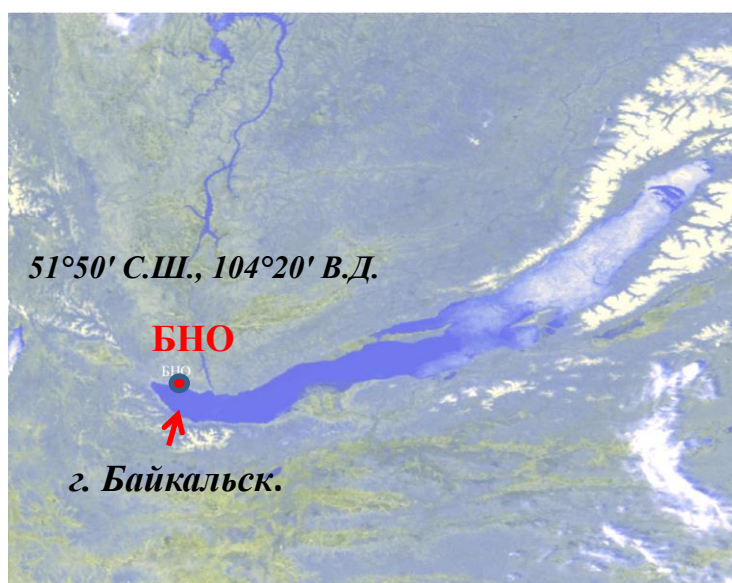


Рис. 2.1.1. Место расположения Байкальской нейтринной обсерватории.

Наличие с середины февраля до середины апреля устойчивого ледового покрова позволяет вести работы по развертыванию телескопа, а также ремонтные, профилактические и исследовательские работы непосредственно со льда озера, используя его как прочную и неподвижную монтажную платформу. Качество ледового покрова, отсутствие устойчивых полей торошения и станowych щелей является определяющим условием с точки зрения безопасности проведения операций по монтажу глубоководного оборудования и прокладке подводных кабельных линий. Сроки безопасного ведения работ обычно превышают 8 недель.

Полномасштабные эксперименты на Байкальском телескопе были начаты в 1998 году, когда был создан детектор НТ200, состоящий из 192

оптических модулей: 8 гирлянд, 24 ОМ на каждой гирлянде. Оптические модули НТ200 содержали гибридные фотодетекторы КВАЗАР-370 [61, 62] с полусферическим фотокатодом диаметром 37 см, разработанные специально для проекта НТ200. В отличие от “обычного” ФЭУ, фотодетектор КВАЗАР включает в свой состав электронно–оптический предусилитель и фотоэлектронный умножитель с малым диаметром фотокатода: “Байкал-1”. В этом фотодетекторе электрон, вылетающий с поверхности фотокатода, ускоряется напряжением ~ 25 кВ и попадает в неорганический сцинтиллятор, расположенный вблизи центра колбы. Этот сцинтиллятор имеет световую отдачу 20 – 30 % по отношению к NaI и время высвечивания 30 – 40 нс. Свет, рожденный в сцинтилляторе, регистрируется обычным ФЭУ. Один фотоэлектрон (ф.э.), выбиваемый из фотокатода, формирует до 25 ф.э., регистрируемых в фотоэлектронном умножителе.

На телескопе НТ200 был получен ряд физических результатов мирового уровня [63-67]. В том числе были проведены исследования атмосферных мюонных нейтрино и установлены пределы на потоки WIMP от Земли и Солнца, медленных и релятивистских магнитных монополей, нейтрино от гамма-всплесков. С помощью телескопа НТ200 было получено одно из самых сильных на тот момент времени ограничений на диффузный поток нейтрино астрофизической природы.

В 2005 году НТ200 был модернизирован с целью увеличения его эффективного объема при регистрации нейтрино сверхвысоких энергий и повышения точности восстановления параметров регистрируемых событий. Идея модернизации заключалась в размещении дополнительных внешних длинных гирлянд с оптическими модулями вокруг центрального детектора.

Нейтринный телескоп НТ200+ [68-71] состоит из центральной части (НТ200) и трех внешних гирлянд (НТ+) расположенных на расстоянии 100 м от центральной части детектора (см. рисунок 2.1.2). На каждой внешней гирлянде размещается по 12 оптических модулей (ОМ), сгруппированных

попарно, аналогично ОМ телескопа NT200. Расстояние между нижней и верхней парами ОМ составляет 140 м. При объединении NT200 и внешних гирлянд в единый детектор NT200+ были решены две основные задачи: модернизирована система управления и сбора данных внешних гирлянд и обеспечена временная синхронизация работы отдельных частей установки с точностью до единиц наносекунд.

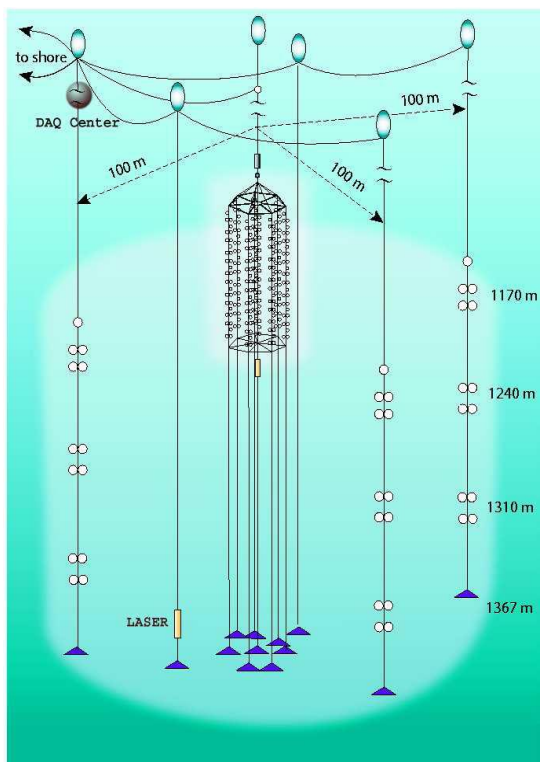


Рис. 2.1.2. *Нейтринный телескоп NT200+.*

Функциональной единицей внешней гирлянды является "связка" - две пары оптических модулей, подключенные к общему электронному системному модулю (СМ). Каждая пара оптических модулей, включенная в режим совпадений для подавления шумовых импульсов, формирует измерительный канал. Информация о временах срабатывания и амплитудах сигналов ФЭУ передается с СМ на блок электроники гирлянды (БЭГ). Все информационные связи внутри гирлянды осуществляются коаксиальными кабелями РК-50-2-13, покрытыми дополнительной резиновой оболочкой.

В состав СМ входят два блока выработки локального триггера, блок преобразования амплитуды, запуска светодиодов и блок управления. Блок

управления служит для установки режимов работы регистрирующей системы и считывания информации о темпах счета фотоприемников. Анодные импульсы фотодетекторов канала поступают на вход блока выработки локального триггера, который содержит схему совпадений и два двухуровневых дискриминатора: временной привязки с фиксированным порогом $\sim 0.25-0.5$ ф.э. и амплитудного отбора с управляемым порогом. Выходной сигнал подается на блок преобразования амплитуды для формирования переднего фронта сигнала локального триггера (ЛТ).

Диодные импульсы с каждого канала поступают на аналоговые сумматоры блока преобразования амплитуды, выполненного на основе стробируемых преобразователей заряд-длительность. На выходе блока формируются выходные сигналы системного модуля – локальные триггеры двух каналов “связки”, длительность которых пропорциональна входным зарядам, а передний фронт определяет время срабатывания канала. Локальные триггеры (запросы каналов) со всех системных модулей гирлянды поступают в блок электроники внешней гирлянды БЭГ. В состав БЭГ входят шесть измерительных каналов, контроллер и модемы каналов данных и управления. Аппаратура БЭГ была разработана с использованием программируемых матриц вентилей (FPGA XILINX Spartan3) для формирования локального триггера гирлянды. Каждый измерительный канал БЭГ содержит 11-ти разрядный преобразователь время-код, 10-ти разрядный преобразователь длительность-код и схему записи номера события. Принцип работы временного преобразователя основан на растяжке временного интервала между сигналом СТАРТ (запрос канала) и СТОП (запрос гирлянды). Дискретность временного преобразователя составляет две наносекунды.

Кабельные системы управления и сбора данных НТ200+ коммутируются через коммутационный центр установки, расположенный на глубине 20 м. Коммутационный центр обеспечивает объединение потоков данных и

трансляцию всей полученной информации в береговой центр сбора данных. Функциональная схема подводного коммутационного центра показана на рисунке 2.1.3. Он состоит из пяти электронных модулей, размещенных в глубоководных стеклянных сферах: общий БЭГ, ретранслятор канала управления (РУ), модуль DSL-модемов и два подводных компьютера: РС-НТ200 и РС-НТ+, обслуживающие установку НТ200 и внешние гирлянды.

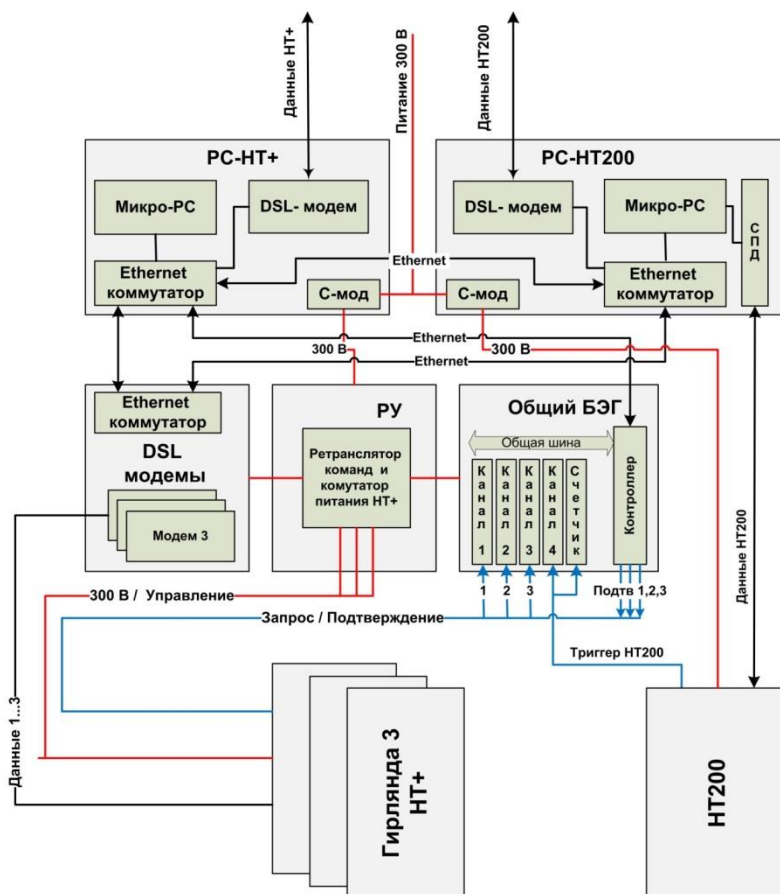


Рис. 2.1.3. Функциональная схема центра коммутации НТ200+.

Данные с внешних гирлянд передаются в коммутационный центр по каналу Ethernet на основе DSL-модемов (FlexDSL-PAM-SAN). Необходимость использования модемов обусловлена значительной удаленностью внешних гирлянд от коммутационного центра – 1,2 километра. Передача данных на берег осуществляется под управлением двух подводных компьютеров.

Создание детектора NT200+ потребовало существенной модификации системы сбора данных установки. Были решены проблемы, связанные с увеличением временного диапазона работы измерительных каналов, с синхронизацией работы внешних гирлянд и с быстродействием систем передачи данных. С точки зрения решения этих принципиальных задач создание детектора NT200+ явилось первым шагом к разработке Байкальского телескопа нового поколения с эффективным объемом порядка кубического километра: Baikal-GVD.

2.2. Разработка базовых элементов системы регистрации и сбора данных

Требования к техническим и конструктивным характеристикам глубоководной аппаратуры нейтринного телескопа Baikal-GVD и принцип организации системы сбора данных установки определяются методикой развертывания детектора, особенностями места расположения телескопа, параметрами водной среды, возможностями привлечения людских ресурсов как на этапе массового тиражирования основных элементов телескопа, так и во время его развертывания в оз. Байкал.

Монтаж телескопа осуществляется при помощи лебедок, которые устанавливаются на льду в месте дислокации установки. С лебедок через майны (отверстия во льду размерами $\sim 1.5 \times 1.5$ м) под воду опускается кабель-трос. По мере опускания кабель-троса на него монтируются глубоководные модули установки и “накладные” кабельные коммуникации, связывающие модули между собой. Возможность сравнительно простого и оперативного монтажа и демонтажа модулей телескопа обеспечивает ремонтпригодность детектора. Методика развертывания установки в значительной степени определяет конфигурацию его регистрирующей системы. Детектор должен состоять из набора вертикальных гирлянд, установленных на дно озера Байкал (гирлянды фиксируются на дне при помощи якорей). Гирлянды представляют собой линейную структуру оптических модулей и модулей

системы управления, закрепленных на кабель-тросе и связанных кабельными коммуникациями. Модули с электроникой, управляющей работой гирлянд, размещают вблизи к поверхности озера (глубина ~25 м).

Поскольку монтаж аппаратуры на гирлянды осуществляется непосредственно со льда озера, а не в лабораторных условиях (как, например, в установке КМЗNeT), для соединения глубоководных модулей между собой необходимо использовать разъемы (применение “проходников” существенно увеличивает время развертывания гирлянды). Это ограничивает возможность применения высокопроизводительных оптоволоконных систем передачи информации между глубоководными модулями. Ограничение на скорость передачи данных и относительно высокий световой фон байкальской воды (скорость счета шумов каналами составляет более 20 кГц) требует использования межмодульных совпадений для подавления шумовых срабатываний. Для организации совпадений оптические модули на гирлянде необходимо объединять в группы, каждая из которых может формировать собственный локальный триггер. При этом ОМ одной группы должны соединяться с модулем обработки сигналов глубоководными кабелями.

Помимо выработки триггера, модули обработки сигналов группы ОМ должны формировать каналы, позволяющие измерять время регистрации импульсов и их амплитуду (заряд). Возможны различные подходы к технической реализации таких измерительных каналов. Один из наиболее эффективных – использование быстрых многоканальных АЦП, позволяющих “сканировать” выходной ток ФЭУ. Такой подход позволяет не только измерять время и амплитуду сигнала, но и дает информацию о его форме. Использование информации о форме импульсов увеличивает надежность идентификации событий: групп мюонов и каскадных ливней. Требуемая точность измерения времени прихода сигналов, обеспечивающая точность восстановления траекторий на уровне ~0,5 градуса, составляет величину

~2 нс. Такая точность достигается при использовании АЦП с частотой дискретизации не менее 200 МГц.

Количество модулей в группе ограничивается, главным образом, длиной кабельных коммуникаций, которая, в свою очередь, зависит от расстояния между ОМ на гирлянде. Характерное расстояние между модулями не должно существенно превышать длину поглощения света в байкальской воде (~ 20 м). Учитывая ограничения на длину кабелей ~100 м (увеличение длины приводит к заметному усложнению процесса монтажа гирлянд), количество модулей в группе должно составлять величину порядка 10 - 12.

Для организации электропитания телескопа используется система энергоснабжения железной дороги. Это в значительной степени снимает ограничение на общее электропотребление детектора: в настоящее время это ограничение составляет 200 кВт. Учитывая перспективы развития телескопа (до ~10 тысяч оптических модулей) и полагая, что до половины электроэнергии может быть использованы на нужды Байкальского стационара, ограничение на энергопотребление одного канала установки составляет ~10 Вт. Данное ограничение не создает существенных проблем при разработке электроники измерительных каналов. Не требуется использования специальных технических решений, снижающих энергопотребление, как в установках IceCube (высокоомные делители напряжений ФЭУ с сопротивлением более 100 МΩ требуют прецизионных методов подготовки электронных плат) или в KM3NeT (применение активных делителей напряжения привело к необходимости использования электропитания ФЭУ напряжением отрицательной полярности, что увеличило уровень шумов ОМ). Однако, с точки зрения уменьшения габаритных размеров и веса глубоководных кабельных коммуникаций, которые влияют на скорость монтажа телескопа, снижение энергопотребления каналов до уровня менее 5 Ватт является актуальной задачей для Baikal-GVD.

Создание нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба требует привлечения значительных человеческих ресурсов как на этапе производства и сборки его элементов, так и в процессе монтажа в оз. Байкал. Минимизация этих ресурсов является одной из ключевых задач. Для этого необходимо максимальное упрощение процедур сборки и наладки регистрирующей аппаратуры, оптимизация конструкции глубоководных корпусов и кабельных коммуникаций для ускорения развертывания детектора.

При проектировании детектора Baikal-GVD в полной мере был использован опыт, накопленный при создании и эксплуатации детектора НТ200. Однако простое тиражирование уже разработанных узлов установки было не приемлемо в условиях увеличения ее масштаба до кубического километра. Аппаратура НТ200 была в значительной степени произведена на элементной базе 90-х годов прошлого века. Развитие электроники за прошедшие 20 лет и возможность выбора промышленных электронных узлов для системы сбора и передачи данных потребовала пересмотра подходов к ее организации и составу аппаратных средств. Система глубоководных кабельных коммуникаций НТ200 была ориентирована на использование глубоководных коаксиальных разъемов, разработанных для НТ200 (СР-50-862/863). Для обеспечения необходимого уровня надежности установки требовалось минимизировать количество глубоководных соединений в установке за счет использования многоштырьковых разъемов и модернизации кабельных систем. Также необходимо было заменить ряд электронных блоков, изготовление которых осуществлялось в условиях мелкосерийного производства, на современную промышленную аппаратуру (в первую очередь блоки систем электропитания и передачи данных).

Основным элементом регистрирующей системы всех нейтринных телескопов, определяющим эффективность их работы, является оптический модуль, регистрирующий черенковское излучение от продуктов взаимодействия нейтрино. Гибридные фотоприемники КВАЗАР-370,

которые применялись в оптических модулях HT200+, не могли быть использованы в установке Baikal-GVD в связи с прекращением их производства. Поэтому одной из основных задач проектирования Baikal-GVD являлась разработка нового глубоководного оптического модуля.

Этапы проектирования аппаратуры Baikal-GVD

Работы по проектированию аппаратуры нейтринного телескопа включали в себя разработку и создание опытных образцов электронных блоков систем регистрации и сбора данных, их тестирование на специализированных контрольно-измерительных стендах в лабораторных условиях и проведение натурных испытаний в оз. Байкал. Деятельность, связанная с созданием новых элементов регистрирующей системы Baikal-GVD, была начата в 2006 году с разработки первых версий нового оптического модуля (ОМ). Одной из основных задач при создании нового ОМ являлся выбор типа фотоприемника. Основными требованиями к фотоприемнику были хорошее временное разрешение (~ 3 нс) и максимальная чувствительность к черенковскому излучению, которая определяется площадью фотокатода и его квантовой эффективностью. Использование модулей с несколькими ФЭУ (аналогично KM3NeT) существенно усложняет процесс сборки и подготовки ОМ, что недопустимо в условиях ограниченных людских ресурсов коллаборации Байкал. Претендентами на роль фотоприемника для Baikal-GVD в тот момент времени были только ФЭУ R8055 Hamamatsu (Япония) с полусферическим фотокатодом диаметром 13” и XP1807 Photonis (Франция) с фотокатодом 12”. На базе этих ФЭУ были созданы и исследованы опытные образцы шести оптических модулей (см. рисунок 2.2.1).

Оптические модули включали в свой состав контроллер, блок усилителя и источник высоковольтного питания ФЭУ. Контроллер позволял регулировать высоковольтное напряжение ФЭУ и выполнял функции

управления светодиодной калибровочной системы ОМ. Ввод напряжения электропитания в ОМ (12 В) осуществлялся по коаксиальному кабелю и был совмещен со спектрометрическим каналом фотоэлектронного умножителя. Это позволило снизить количество разъемов ОМ до двух (один разъем на линию управления, и один для электропитания и выходного сигнала). Для электропитания ОМ использовался внешний преобразователь 300В - 12В, разработанный для НТ200. Его основным преимуществом был низкий уровень собственных шумов (менее 10 мВ), но при этом к.п.д. не превышал 60%. В 2009 году контроллер ОМ был модернизирован. В него была добавлена возможность формирования тестового импульса, имитирующего сигналы от ОМ, увеличена максимальная частота сигналов, запускающих калибровочные светодиоды с 0,1 кГц до 10 кГц, и установлен счетчик импульсов с регулируемым порогом для мониторинга уровня шумов ФЭУ. Кроме того, были улучшены временные параметры усилителя сигналов ФЭУ и добавлен дополнительный вход для имитатора сигналов.

Характеристики новых оптических модулей исследовались как в лабораторных, так и в натуральных условиях на установке НТ200+. На рисунке 2.2.1 показаны результаты измерений относительной чувствительности оптических модулей с ФЭУ разного типа [72]. Лабораторные исследования проводились при помощи калибровочного светодиодного источника (длина волны 470 нм). Для исследований в натуральных условиях два оптических модуля с разными типами ФЭУ были установлены на внешнюю гирлянду НТ+ во время экспедиции 2007 года и подключены к системе сбора данных телескопа. Измерения относительной чувствительности были проведены при помощи лазерного калибровочного источника (475 нм). Было получено, что относительная чувствительность оптических модулей разного типа приблизительно одинакова (большая площадь фотокатода ФЭУ R8055 компенсируется более высокой квантовой эффективностью ФЭУ XP1807). Учитывая существенно более низкую стоимость XP1807 при одинаковом

временном разрешении ФЭУ этих двух типов (~3 нс), XP1807 был выбран как наиболее перспективный для дальнейшего использования.

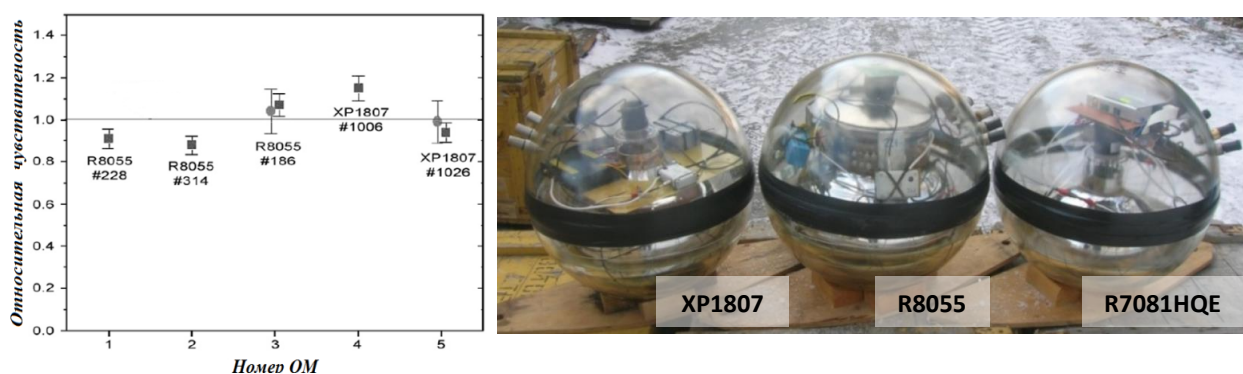


Рис. 2.2.1. Соотношение эффективных чувствительностей ФЭУ R8055 и XP1807, измеренные в лаборатории (квадраты) и в оз. Байкал (окружности) и фотографии опытных образцов ОМ с ФЭУ разного типа.

Другим направлением работ, связанных с созданием аппаратуры для Baikal-GVD, было исследование возможностей использования в новом детекторе регистрирующей системы на основе аналогово-цифровых преобразователей (АЦП), позволяющих измерять форму импульсов сигналов с ФЭУ. Во время экспедиции 2007 года на внешней гирлянде NT200+ были размещены два новых оптических модуля с ФЭУ R8055 оснащенных системой обработки сигналов на базе промышленных АЦП с частотой дискретизации 250 МГц для измерения формы их импульсов [72]. АЦП подключались через USB-порт к одноплатному компьютеру emETX-i701, расположенному в глубоководном корпусе рядом с оптическими модулями. Формирование событий осуществлялось под управлением общего триггера NT200+. На данной установке были зарегистрированы первые временные кадры сигналов с ФЭУ, содержащие информацию о форме регистрируемых импульсов. На рисунке 2.2.2 представлены примеры кадров событий, генерированных шумами ФЭУ, атмосферными мюонами и лазерным калибровочным источником света. Форма импульса, инициированного лазером, иллюстрирует влияние рассеяние света в воде на регистрацию источников света, удаленных на значительные расстояния (расстояние до лазера ~140 м, фотокатод ФЭУ направлен в противоположную от лазера

сторону). На основании полученной информации были разработаны методы измерения времени прихода и заряда сигналов ФЭУ и получены первые оценки точности измерения этих величин.

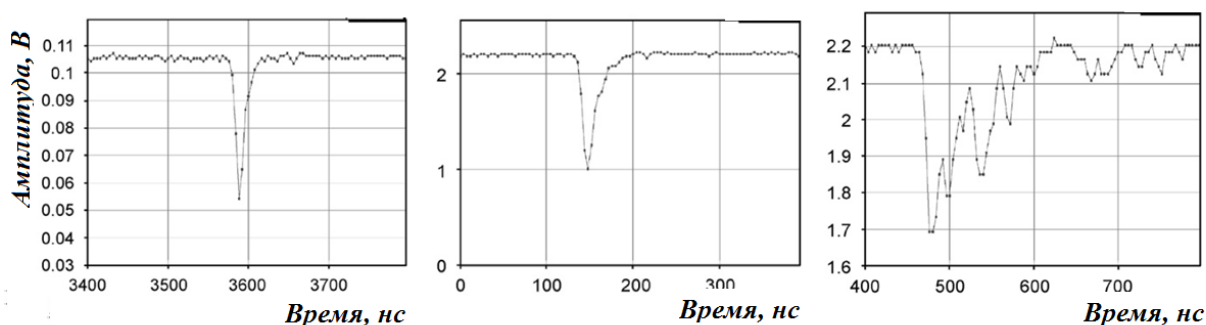


Рис. 2.2.2. Примеры кадров событий, зарегистрированных на прототипе измерительного канала: шумовой импульс (слева), мюонное событие (в центре), импульс от калибровочного лазера (справа).

В 2007 году был разработан первый вариант конструкции гирлянды оптических модулей. Одной из проблем, которые необходимо было решить при конструировании – сокращение времени монтажа гирлянд со льда озера для эффективного развертывания крупномасштабной установки. Для этого был изменен способ соединения гирлянд с центром сбора данных установки (см. рисунок 2.2.3). Вместо использования накладного кабеля, который монтировался на несущий кабель трос во время опускания гирлянды (длина около 1 км) в конструкции новых гирлянд был применен несущий кабель-трос. Конструкция несущего глубоководного кабеля с продольной герметизацией, в состав которого входила витая пара, два коаксиала и жилы электропитания 300 В, была разработана для Байкальского эксперимента на заводе “Псковгеокабель”. По этой технологии в 2008 году рядом с телескопом НТ200+ была установлена экспериментальная гирлянда из 6 оптических модулей (в 2009 году количество ОМ было увеличено до 12). На базе экспериментальной гирлянды в период 2008 – 2010 гг. проводились испытания и доработка базовых элементов Baikal-GVD: оптического модуля, блоков АЦП, аппаратуры системы управления и передачи данных [73-76].

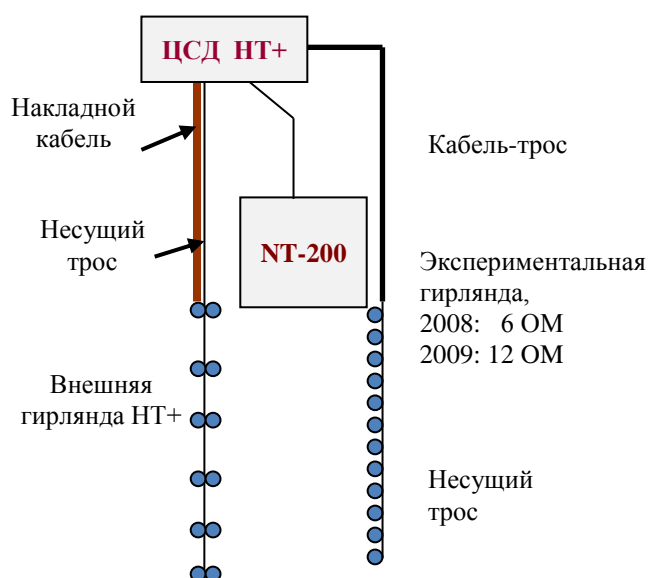


Рис. 2.2.3. Способы монтажа кабельных коммуникаций гирлянд: монтаж накладного кабеля на несущий трос (внешняя гирлянда NT200+) и использование несущего кабель-троса (экспериментальная гирлянда новой установки).

К 2009 году в основном была закончена разработка оптического модуля Baikal-GVD на основе ФЭУ Photonis XP1807. Но к этому времени фирма Photonis прекратила выпуск фотоэлектронных умножителей этого типа. Однако фирма Hamamatsu анонсировала свою новую разработку: ФЭУ R7081HQE с 10" SBA-фотокатодом (Super Bialkali). Уменьшение площади фотокатода примерно на 40% по сравнению с 12" фотоэлектронным умножителем компенсировалось в этих ФЭУ повышением его квантовой эффективности: ~35% вместо 25% для обычного би-щелочного фотокатода. Именно этот ФЭУ в настоящее время используется в нейтринном телескопе Baikal-GVD (при переходе к массовому производству название ФЭУ R7081HQE было изменено на R7081-100) [77].

Внешний вид оптического модуля представлен на рисунке 2.2.4. Разработанный вариант ОМ выгодно отличается от его современных аналогов простотой сборки, что являлось одним из основных требований при его проектировании. Электронные компоненты ОМ [78] размещаются в глубоководной стеклянной сфере VITROVEX диаметром 42 см. Для

уменьшения влияния магнитного поля Земли, ФЭУ помещается в экранирующую сетку из пермаллоя.



Рис. 2.2.4. Оптический модуль на основе ФЭУ R-7081HQE (версия 2010 года).

Контроллер, усилитель и высоковольтный конвертер монтируются на цоколе ФЭУ. Драйверы со светодиодами калибровочными источниками света подключаются к контроллеру ОМ через высокочастотные разъемы стандарта SMA. Свет от светодиодов поступает в центр фотокатода ФЭУ по оптическим волокнам. Усиленный сигнал с фотоэлектронного умножителя выводится из модуля через глубоководный коаксиальный разъем CP-50-862/863. Через этот же разъем вводится электропитание. Для ввода шины управления RS-485 в ОМ используется аналогичный разъем. Между двумя разъемами размещен вакуумный клапан, на котором закреплен манометр для контроля давления внутри модуля.

Система сбора данных экспериментальной гирлянды была подготовлена на основе опытной версии плат 4-х канальных АЦП с частотой дискретизации 200 МГц, разработанных для Байкальского эксперимента фирмой ООО "Высокие технологии СК". В платах АЦП была предусмотрена возможность формирования двух сигналов *запрос* с управляемыми порогами (реализация идеи совпадения соседних ОМ с высоким и низким порогом для формирования триггера). Обмен данными между платами АЦП и платой "Мастер", управляющей их работой, осуществлялся по шине VME.

В этот период была разработана общая концепция организации гирлянды регистрирующей системы Baikal-GVD [79-82]. Основным структурным элементом регистрирующей системы гирлянды является секция из 12 оптических модулей. Помимо оптических модулей, каждая секция включает в свой состав центральный модуль (ЦМ) и сервисный модуль (СМ). Блок-схема секции показана на рисунке 2.2.5.

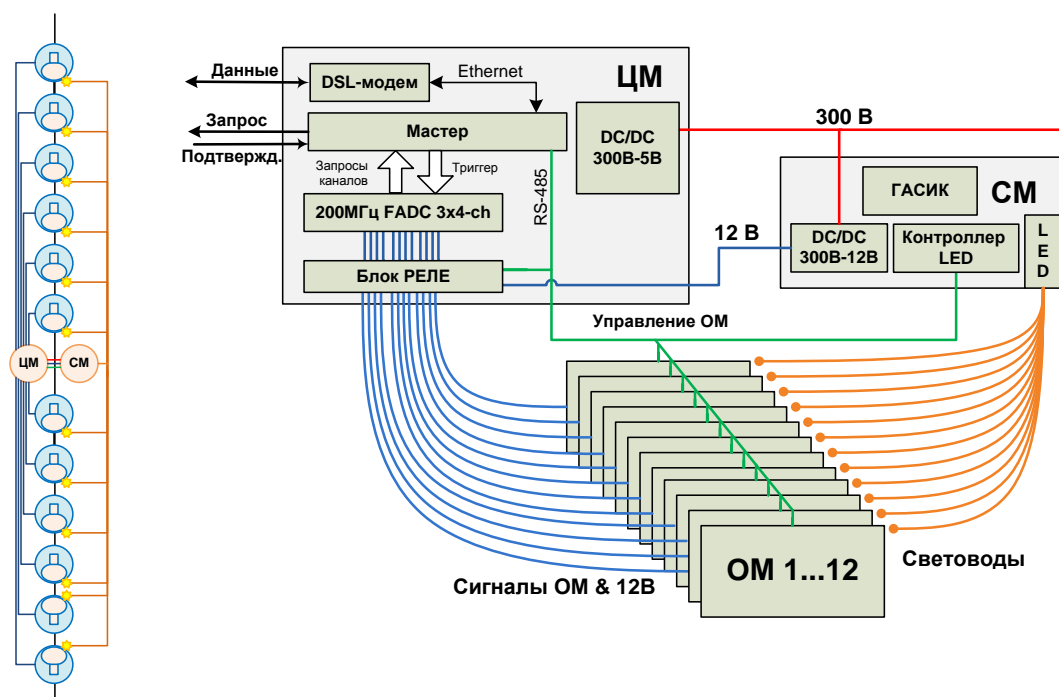


Рис. 2.2.5. Функциональная схема секции (версия 2010 года) и ее размещение на гирлянде. ЦМ – центральный модуль, СМ – сервисный модуль, ГАСИК – гидроакустическая система измерения координат.

Центральный модуль выполняет функции сбора данных и управления работой секции. Аналоговые сигналы от 12 оптических модулей поступают на ЦМ по коаксиальным кабелям длиной ~90 м. Преобразование сигналов с ФЭУ в цифровой код осуществляется тремя платами 4-х канальных 12-битных АЦП с частотой дискретизации 200 МГц. На каждом канале формируются временные кадры событий длительностью 5 мкс, представляющие собой осциллограммы сигналов с временной дискретностью 5 нс. Анализ временных кадров позволяет определить количество импульсов,

их амплитуду и время регистрации. Для минимизации мертвого времени каналов для хранения данных каждого АЦП предусмотрено два буфера памяти: во время считывания информации из первого буфера запись данных производится во второй.

Считывание данных секции осуществляется по каналу Ethernet платы Мастер, который удлиняется до длины ~1000 м посредством DSL-модема (скорость передачи до ~10 Мбит/с). Для управления работой оптических модулей, калибровки и мониторинга аппаратуры (процессов, не требующих больших скоростей передачи данных), используется локальная подводная шина данных RS-485 на основе ASCII-протокола. Преобразователь Ethernet / RS-485 реализован на плате Мастер.

Напряжение электропитания передаётся на оптические модули от линейных преобразователей постоянного напряжения 300 В – 12 В, установленных в сервисном модуле секции, через плату объединения электропитания и сигналов. На этой плате также реализовано релейное управление включением ОМ, позволяющее отключать модули от источника напряжения в случае возникновения короткого замыкания.

Помимо преобразователей напряжения, в СМ размещены элементы системы мониторинга и калибровки, а также электроника гидроакустической системы измерения координат (ГАСИК). Система мониторинга позволяет получать информацию о величине напряжения электропитания секции и каждого оптического модуля (300 В, 12 В), о температуре внутри ОМ, о высоковольтных напряжениях на фотоэлектронных умножителях и темпе счета шумовых импульсов ФЭУ. Калибровка каналов осуществляется импульсными светодиодными источниками света, сигналы от которых по оптическим кабелям разветвляются на все оптические модули секции.

В дальнейшем конфигурация секции была несколько изменена в сторону упрощения – сервисный модуль секции удалось исключить из конфигурации, а аппаратуру СМ частично перенести в ЦМ (конвертеры

300 В–12 В), а частично полностью исключить (блоки электроники калибровочной светодиодной системы).

Натурные испытания аппаратуры секции проводились в оз. Байкал в период с 2008 по 2010 год. В 2008 году была установлена гирлянда из 6 оптических модулей. В 2009 г. гирлянда была расширена до 12 ОМ – две секции по 6 ОМ каждая. Расстояния между ОМ составляли 10 м, общая длина гирлянды – 110 м. Все фотоэлектронные умножителя гирлянды кроме двух нижних были ориентированы фотокатодами вверх. В центре гирлянды были расположены два центральных модуля, один сервисный модуль и компьютерный модуль (РС-сфера), выполняющий роль центра сбора данных. В гирлянде использовались ФЭУ Photonis XP1807, Hamamatsu R8055 и R7081HQE.

Система управления и передачи данных экспериментальной гирлянды (см. рисунок 2.2.6) была максимально приближена к базовой конфигурации, разработанной для секции. Роль центра сбора данных выполнял компьютерный модуль, обеспечивающий формирование общего сигнала *подтверждение* двух секций и передачу данных в Береговой центр по каналу Ethernet через DSL-модем. Поскольку компьютерный модуль расположен в непосредственной близости от центральных модулей гирлянды, связь его с ЦМ1 и ЦМ2 осуществляется без использования DSL-модемов, как в базовой конфигурации аппаратуры секции. Аппаратура ГАСИК располагалась в отдельных модулях в верхней и нижней части гирлянд.

Основной задачей, которая решалась на экспериментальной гирлянде, являлась комплексная проверка работы всех электронных узлов, глубоководных кабельных коммуникаций и несущих конструкций в условиях долговременной экспозиции аппаратуры в потоке космического излучения. В общей сложности за период с 2008 по 2010 годы экспериментальная гирлянда в различных конфигурациях проработала около 12 месяцев. За это время не было зафиксировано значимых ошибок в функционировании или

нарушения герметичности основных узлов гирлянды: оптических модулей, блоков АЦП и управления, глубоководных кабелей и разъемов.

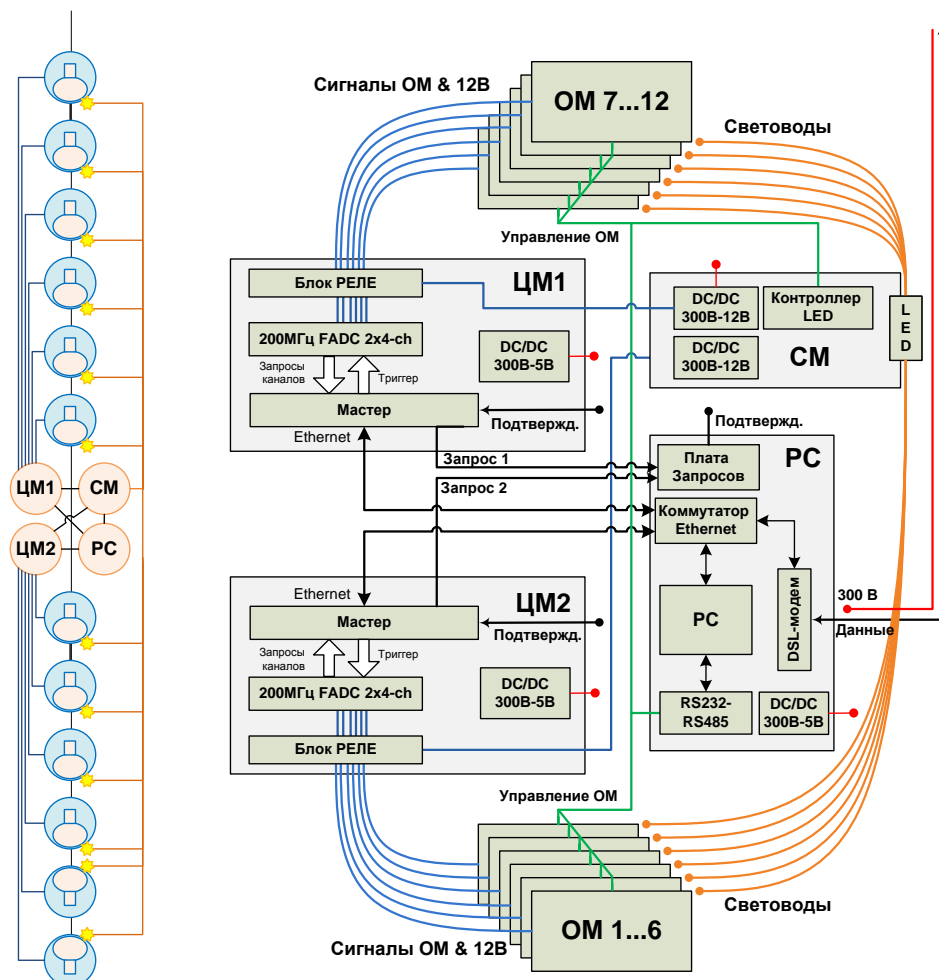


Рис. 2.2.6. Блок-схема и размещение модулей экспериментальной гирлянды из двух секций по 6 ОМ: ЦМ – центральный модуль, СМ – сервисный модуль, РС – компьютерный модуль.

Однако, в указанный период времени были зафиксированы случаи выхода из строя DC/DC конвертеров сервисного модуля, обеспечивающих электропитание оптических модулей 12 В. Проблема была решена в 2011-2012 годах путем замены этих элементов на промышленные блоки. Вместо линейных преобразователей 300 В–12 В (к. п. д. 60%) были использованы импульсные преобразователи фирмы TRECО POWER TCL 060-112 (к. п. д. 88%, время наработки на отказ около 3×10^6 часов) [83]. При очевидном выигрыше по эффективности и надежности, импульсные преобразователи имели существенно более высокий уровень шума по сравнению с

линейными: около 50 мВ пик-пик (частота 20 МГц). В этих условиях использование одних и тех же жил кабеля для передачи сигнала и электропитания приводило к необходимости увеличения амплитуды одноэлектронных сигналов ФЭУ до $\sim 10^2$ мВ, вместо планируемых 30 мВ. Это, в свою очередь, более чем в три раза уменьшало величину диапазона линейного преобразования каналов. Поэтому сигнал и питание были разделены, а два коаксиальных разъема ОМ заменены на один 5-контактный разъем фирмы SubConn [84]. Следует отметить, что после замены DC/DC конвертеров в течение 6 лет эксплуатации не было зафиксировано ни одного случая выхода их из строя.

На экспериментальной гирлянде были проведены исследования величины временного разрешения и точности калибровки измерительных каналов на базе АЦП, измеряющих форму импульсов ФЭУ [85, 86]. Временное разрешение каналов измерялось в режиме подсветки гирлянды светодиодным источником. Источник, расположенный в центре гирлянды в сервисном модуле, генерировал серию двойных импульсов со строго фиксированным временным интервалом (задержкой) между ними. Задержка (~ 500 нс) была выбрана таким образом, чтобы оба импульса попадали во временное окно одного события. Световые импульсы передавались ко всем ОМ гирлянды по оптическим кабелям. Положение импульсов на временных дорожках каналов определялось по факту превышения фиксированного порога, выбранного на уровне $\sim 0,5$ ф.э. На рисунке 2.2.7 представлены результаты измерения величины задержки между импульсами светодиодного источника для всех каналов гирлянды. Усредненная по всем каналам величина задержки (498,3 нс) отличается от ожидаемой (497,5 нс) менее чем на 1 нс. Среднеквадратичный разброс средних задержек каналов составляет 1,6 нс. Это значение характеризует временное разрешение канала гирлянды. Следует отметить, что можно добиться улучшения временного разрешения, используя для определения положения импульсов на дорожке следящий

порог: 50% амплитуды сигнала. Именно такой подход в дальнейшем и был использован для временного анализа. Значительный разброс по величине среднеквадратичного отклонения объясняется разницей амплитуд световых импульсов (от 1 до 10^2 ф.э.), которая обусловлена различными условиями фокусировки света от светодиодов источника на вводы оптических кабелей. Этой причиной, в частности, объясняется отсутствие информации по 3-му каналу на рисунке 2.2.7.

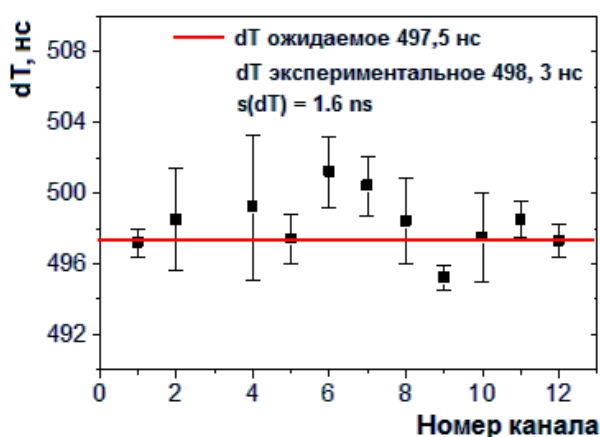


Рис. 2.2.7. Измеренные при помощи “сканирующего” АЦП задержки между сигналами на каналах экспериментальной гирлянды.

Точность временной калибровки каналов – второй фактор, влияющий на временные характеристики детектора. Калибровка подразумевает определение относительных временных сдвижек каналов t_{shift} , обусловленных разницей в задержках кабельных коммуникаций каналов и фотоэлектронных умножителей. Временная калибровка секции производилась при помощи светодиодного источника света, расположенного в сервисном модуле. Световой импульс от источника разветвлялся и подводился к каждому оптическому модулю по оптоволоконным кабелям с калиброванной задержкой. Измерение времени регистрации этого импульса осуществлялось всеми каналами секции, что при известной временной задержке в оптическом кабеле позволяло определить относительные временные сдвижки каждого канала. Эта методика была испытана при эксплуатации детекторов НТ200 и НТ200+ и обеспечила точность временной калибровки ~ 2 нс. Недостатком

данного подхода является необходимость монтажа 12 оптоволоконных кабелей на гирлянде, что заметно увеличивало время ее развертывания со льда оз. Байкал.

Возможность измерения формы сигналов (“осциллограмм”) при помощи АЦП новой системы сбора данных позволило реализовать альтернативный метод временной калибровки, который основан на прямом измерении временной задержки сигнала в оптическом модуле (измеряется время между сигналом запуска светодиода и сигналом от светодиода, зарегистрированным ФЭУ). Сравнение результатов калибровки, проведенной двумя методами, показало, что точность измерения задержек оптических модулей лучше 2 нс. Успешные испытания новой системы калибровки позволили исключить калибровочную систему на основе оптоволоконных кабелей, что существенно сократило время монтажа гирлянд.

Точность измерения времени регистрации черенковского излучения каналами экспериментальной гирляндой оценивалась по результатам ее калибровки лазерным источником света. Калибровочный лазер представляет собой изотропный источник света с интенсивность излучения до 5×10^{13} фотонов на импульс при длине волны 475 нм и длительности светового импульса менее одной наносекунды. Лазерный источник был расположен на расстоянии около 100 м от экспериментальной гирлянды на глубине $\sim 1,2$ км. Гидроакустическая система измерения координат обеспечивала точность определения взаимного расположения лазерного источника и оптических модулей гирлянды на уровне 0,5 м. Это позволило сопоставить ожидаемое время регистрации излучения каналами гирлянды с экспериментально полученными значениями. В качестве экспериментально измеряемого параметра использовалась разность времен срабатывания каналов dT . Результаты сопоставления измеренных значений $dT_{изм}$ и ожидаемых из геометрических соображений dT_{geom} представлены в таблице 2.2.1 в зависимости от расстояния между каналами. Значения $dT_{изм}$ в таблице

получены в результате усреднения по всем комбинациям каналов, находящимся на данном расстоянии R . Полученные результаты показывают, что точность измерения времен регистрации каналами гирлянды составляет 1-2 нс.

Таблица 2.2.1. Временная калибровка каналов гирлянды лазерным источником света

Расстояние между каналами dR , м	10	20	30	40	50
$dT_{изм} - dT_{геом}$, нс	0,3	- 1,2	- 2,2	0,5	1,3

Исследования фоновых условий регистрации в оз. Байкал на экспериментальной гирлянде не выявили новых эффектов по сравнению с исследованными ранее на детекторе НТ200. На рисунке 2.2.8 показана зависимость от времени темпа счета шумовых импульсов (порог ~ 0.5 ф.э.) для трех каналов гирлянды, расположенных на расстоянии 10 м друг от друга. Измерения выполнены при помощи счетчиков сигналов, встроенных в контроллеры оптических модулей. Четко выраженная корреляция темпов счета каналов указывает, что существенной составляющей шумов ФЭУ является свечение воды оз. Байкал. Независимые исследования показывают, что природа свечения связана с процессами хемилюминесценции. Наряду с относительно стабильными периодами свечения наблюдаются всплески его интенсивности, увеличивающие темп счета шумовых импульсов в несколько раз. Природа возникновения таких всплесков связана с переносом светящихся масс течениями в оз. Байкал.

Атмосферный поток мюонов представляет собой естественный калибровочный источник, который позволяет проверить работоспособность регистрирующей системы установки, а также оценить эффективность подавления фона и процедуры реконструкции событий. Экспериментальная информация, полученная на гирлянде, была использована для восстановления углового распределения атмосферных мюонов (набор

данных 2010 года) [86]. На рисунке 2.2.9 представлено угловое распределение восстановленных событий: экспериментальное и полученное из Монте-Карло. Хорошее согласие между моделью и экспериментом указывает на корректность работы измерительной и калибровочной систем гирлянды.

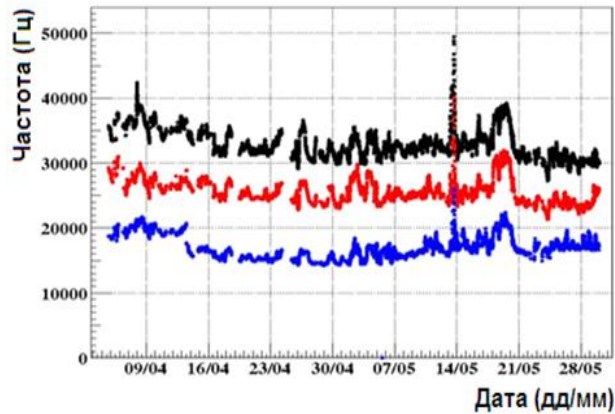


Рис. 2.2.8. Темп счета трех каналов экспериментальной гирлянды в течение двух месяцев экспозиции.

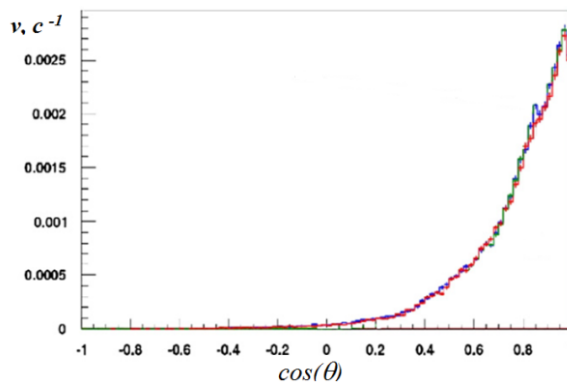


Рис. 2.2.9. Экспериментально измеренная (голубой кривая) и моделированная (красная кривая) зависимости скорости счета событий от зенитного угла.

Исследования временных параметров гирлянды, проведенные со светодиодным источником света, с лазерным калибровочным источником и в режиме экспозиции в потоке атмосферных мюонов, позволили оценить точность измерения времени регистрации черенковского излучения каналами гирлянды, которая составила ~ 2 нс. Проведенные исследования позволили собрать необходимый материал для разработки общей концепции детектора Baikal-GVD, оптимизации его конфигурации и расчета основных физических

параметров: точности реконструкции направления прихода событий, энергетического разрешения, эффективной площади и объема установки.

2.3. Архитектура регистрирующей системы Baikal-GVD и оптимизация конфигурации телескопа

Концепция Baikal-GVD базируется на ряде достаточно очевидных требований, предъявляемых к конструкции и организации регистрирующей системы нового детектора: (1) максимально возможное использование преимуществ монтажа телескопа с ледяного покрова оз. Байкал, (2) наращиваемости установки и обеспечения ее эффективной эксплуатации уже на первых стадиях развертывания, (3) возможности реализации различных вариантов компоновки фотодетекторов в рамках одной измерительной системы. Кроме того, принципиальным требованием является минимизация времени создания полномасштабного детектора, которое не должно превышать 4 – 5 лет.

На основании перечисленных выше требований и опыта создания и эксплуатации экспериментальной гирлянды был разработан базовый вариант конфигурации детектора, который стал основой для дальнейших экспериментальных и расчетных работ в рамках подготовки научно-технического проекта и поэтапного создания глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD [87]. Основными регистрирующими элементами телескопа являются фотоэлектронные умножители (ФЭУ) с полусферическим фотокатодом диаметром не менее 250 мм. Наиболее подходящим кандидатом для использования в Baikal-GVD на настоящий момент времени являются ФЭУ R7081-100 фирмы Hamamatsu с диаметром фотокатода 10” и квантовой эффективностью ~35%. В случае успешной разработки ФЭУ с диаметром фотокатода 12” и аналогичной квантовой эффективностью (такие работы проводятся фирмой Hamamatsu),

предусмотрена возможность их использования без изменения конструкции оптического модуля.

ФЭУ вместе с управляющей электроникой размещаются в глубоководных стеклянных корпусах, образуя оптические модули. Оптические модули монтируются на вертикальных грузонесущих кабелях, формируя гирлянды. Основной структурной единицей системы сбора данных гирлянды является *секция* оптических модулей. *Секция* представляет собой функционально законченный узел, включающий в себя системы регистрации излучения, формирования триггера, обработки сигналов, передачи данных и калибровки. Организация системы сбора данных секции позволяет формировать различные конфигурации размещения оптических модулей. Возможна установка ОМ на различных расстояниях друг от друга индивидуально или попарно. На одной гирлянде можно разместить несколько секций в различных конфигурациях. Конфигурация секции, являющаяся в настоящее время основой для создания телескопа, включает в свой состав 12 оптических модулей, расположенных на расстояниях 10 – 20 метров вдоль гирлянды, и центральный модуль секции (ЦМ), обеспечивающий преобразование аналоговых сигналов в цифровой код, расположенный в середине секции для минимизации длин кабелей ОМ. В случае необходимости к ЦМ может быть подключен дополнительный служебный модуль (СМ), в котором могут быть размещены вспомогательные устройства: светодиодная калибровочная система, акустическая система позиционирования, датчики для мониторинга состояния водной среды оз. Байкал. Аналоговые сигналы со всех ОМ секции передаются в ЦМ по коаксиальным кабелям одинаковой длины (90 м). По этим же кабелям к оптическим модулям подводится электропитание 12 В и линия управления. В ЦМ осуществляется формирование локального триггера секции, преобразование аналоговых сигналов с оптических модулей в цифровой код, формирование временных кадров, содержащих информацию о форме

импульсов ОМ, первичная обработка данных и их передача в центр сбора данных установки по каналу Ethernet. Условием формирования локального триггера секции является совпадение сигналов от двух соседних оптических модулей с “низким” и “высоким” порогами (~ 1 и ~ 3 фотоэлектронов). Для синхронизации работы каналов на модули АЦП подается общий для всех секций сигнал *подтверждение* (глобальный триггер), который инициирует чтение и передачу данных каналов. Местоположение оптических модулей гирлянды определяется при помощи гидроакустической системы измерения координат, точность позиционирования которой должна быть не хуже 20 см.

Каналы синхронизации, электропитания и передачи данных секций объединяются в коммутационном модуле гирлянды (МГ), который связан кабельными линиями длиной от 700 до 1200 м (в зависимости от количества секций на гирлянде) с центром управления кластера (ЦК), расположенным вблизи поверхности озера. Минимальная конфигурация кластера включает в свой состав восемь гирлянд (одна центральная и семь периферийных) содержащих по 24 ОМ каждая (две секции на гирлянде). Центр управления кластера выполняет функции коммутации электропитания гирлянд (300 В), обмена данными между гирляндами кластера и Береговым центром сбора данных и формирования триггера кластера (сигнала *подтверждение*). В рабочем режиме установки сигнал *подтверждение* формируется по любому пришедшему локальному триггеру секции.

Кластеры гирлянд связаны с Береговым центром комбинированными электро-оптическими кабельными линиями длиной ~ 6 км. Каждый кластер является функционально законченным детектором, способным работать как в составе единой установки, так и в автономном режиме. Это обеспечивает простоту наращивания установки и возможность ввода в эксплуатацию ее отдельных частей по мере развертывания Baikal-GVD.

Временной график развертывания нейтринного телескопа включает два этапа. На первом этапе (до 2020 года) планируется развернуть в озере Байкал

установку с характерными размерами $\sim 0,5 \text{ км}^3$, содержащую $\sim 2 \times 10^3$ оптических модулей. Дальнейшее развитие детектора предполагает его наращивание до масштабов $\sim 10^4$ оптических модулей. Базовая конфигурация телескопа на первом этапе создания детектора включала в свой состав 12 кластеров оптических модулей по 8 гирлянд в каждом кластере и по две секции из 12 оптических модулей в каждой гирлянде (см. рисунок 2.3.1).

Выбор оптимальной конфигурации, а также оценка светосилы и разрешающей способности Baikal-GVD были основаны на результатах лабораторных исследований параметров оптического модуля (в первую очередь его угловой чувствительности – см. главу 3), на исследованиях характеристик гирлянды Baikal-GVD и на моделировании отклика телескопа на черенковское излучение мюонов и ливней [88, 89]. В качестве параметров, которые варьировались в процессе оптимизации конфигурации телескопа были выбраны: Z – расстояние между оптическими модулями на гирлянде; R – расстояние между центральной и периферийными гирляндами (радиус кластера); H – расстояние между центральными гирляндами соседних кластеров (см. рисунок 2.3.1).

Для решения задачи моделирования отклика установки была модернизирована библиотека расчетных программ, созданных для НТ200, включающая программы моделирования процесса распространения черенковского излучения в воде оз. Байкал, программы восстановления мюонных траекторий и программы восстановления координат и энергии каскадных ливней. В случае мюонов оптимизируемой величиной являлась эффективная площадь регистрации, в случае ливней – эффективный объем. Все расчеты проводились для варианта оптических модулей на основе ФЭУ ФЭУ R7081-100.

Моделирование проводилось в несколько этапов. На первом этапе производился розыгрыш энергии, направления и координат мюона или ливня. На следующем этапе разыгрывалось распространение черенковских

фотонов от источника до фотодетекторов с учетом процессов поглощения и рассеяния света в воде. Далее проводился розыгрыш отклика оптического модуля на черенковское излучение с учетом квантовой и угловой чувствительности ОМ. В случае, когда отклик телескопа удовлетворял заданным триггерным условиям, информация о событии сохранялась в банке данных моделирования. Направление мюонов разыгрывалось изотропно по нижней полусфере. Площадь моделирования для заданного направления определялась максимальным расстоянием регистрации оптическим модулем мюона заданной энергии. Начало прослеживания трека (т.е. моделирование ливней на треке мюона) также определялось максимальным расстоянием регистрации при максимально возможной энергии ливня.

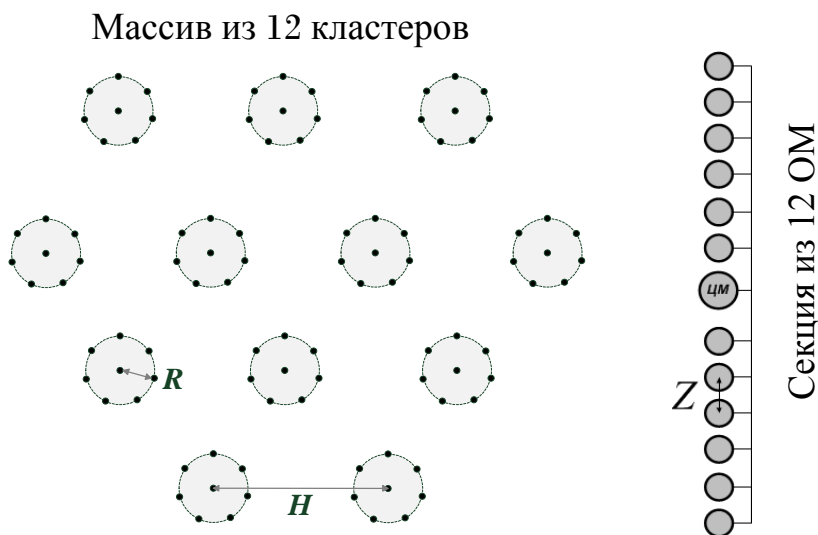


Рис. 2.3.1. Базовая конфигурация нейтринного телескопа Baikal-GVD (первая очередь) и схема секции из 12 оптических модулей. Z , H , и R – параметры оптимизации.

После розыгрыша значимого числа событий с фиксированными исходными параметрами вычислялись эффективная площадь для мюонов и эффективный объем для ливней. Условием отбора событий для вычисления эффективной площади для мюонов являлось срабатывание не менее 6 оптических модулей на трех гирляндах. Это условие обеспечивает возможность восстановления всех геометрических параметров трека мюона. Поскольку менее энергичные мюоны дают меньшую засветку, то наиболее

критичным является поведение эффективной площади в припороговой области регистрации мюонов (для телескопа Baikal-GVD порог регистрации находится в области 10 ТэВ).

Расчеты эффективной площади для регистрации мюонов были проведены для 30 конфигураций телескопа со следующими комбинациями геометрических параметров: $Z = 15, 20$ м; $R = 40, 60, 80, 100$ и 120 м; $H = 150, 200, 250, 300$ м; расстояние между секциями одной гирлянды $X = Z$ и 100 м. В левой части рисунка 2.3.2 представлены рассчитанные эффективные площади для регистрации мюонов с энергией 10 ТэВ, усредненные по зенитному и азимутальному углам. Как видно из рисунка, предпочтительным является вариант, когда радиус кластера R составляет величину 40 – 60 метров. Для меньших значений R расчеты не проводились, поскольку расстояния между гирляндами меньше 40 метров трудно реализовать по техническим соображениям (возможен взаимный “перехлест” гирлянд из-за подводных течений в озере). Эффективная площадь слабо зависит от расстояния между кластерами (H), и выбор оптимального значения H определяется величиной эффективного объема для ливней. Увеличение вертикальной базы детектора за счет увеличения расстояния между секциями гирлянды X существенно уменьшает величину эффективной площади.

В правой части рисунка 2.3.2 представлены зависимости эффективной площади от энергии мюонов в диапазоне 100 ГэВ – 1 ПэВ для конфигураций детектора с близкими значениями геометрических параметров. Из рисунка видно, что увеличение радиуса кластера и расстояния между оптическими модулями значительно снижает эффективную площадь при около пороговых энергиях.

Для исследования зависимости эффективного объема для регистрации ливней от геометрических параметров установки было выполнено моделирование откликов 12-ти различных конфигураций телескопа. Набор геометрических параметров для моделирования эффективной площади и

эффективного объема в значительной степени совпадал. Расстояние между ОМ на гирлянде Z составляло 15 и 20 метров, радиус кластера R - 60 и 80 метров, расстояние между кластерами H - 200, 250 и 300 метров.

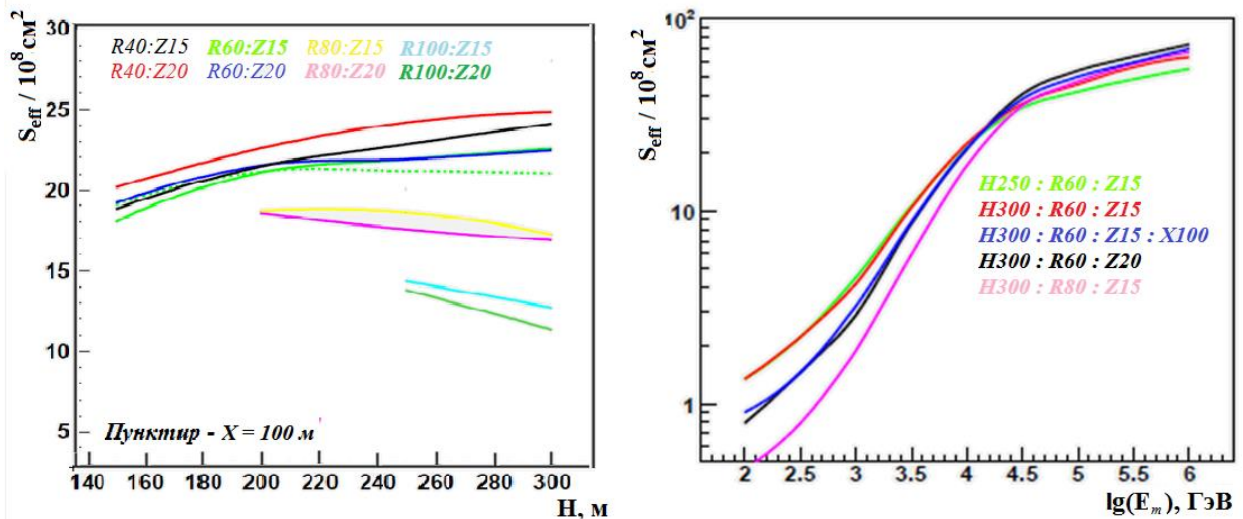


Рис. 2.3.2. Зависимость эффективной площади Baikal-GVD от геометрических параметров установки для энергии мюонов 10 ТэВ (слева) и от энергии мюонов (справа).

Энергия ливней высоких энергий выбиралась из диапазона $10^4 - 10^9$ ГэВ. Направление ливней разыгрывалось сферически изотропно, координаты центра тяжести ливня – равномерно в объеме 1 км^3 с центром в точке расположения телескопа. При моделировании отклика каждой конфигурации было разыграно 4×10^6 событий. Общее число событий, разыгранных в результате моделирования всех конфигураций, составило величину 5×10^7 .

Результаты моделирования показаны на рисунке 2.3.3. Эффективный объем для ливней слабо зависит как от расстояний между оптическими модулями, так и от радиуса кластера, при равных значениях остальных геометрических параметров. Зависимость эффективного объема от энергии для конфигураций с расстоянием между модулями 15 и 20 метров отличаются по величине не более чем на 15%. Распределения эффективных объемов по энергии для радиусов кластера 60 и 80 метров при энергиях выше 100 ТэВ практически совпадают.

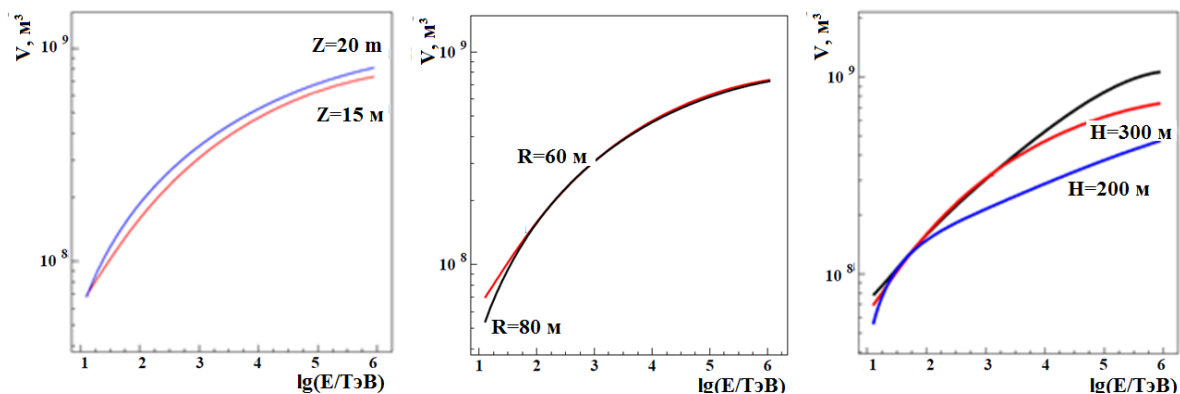


Рис. 2.3.3. Зависимости эффективного объема регистрации от энергии ливней для разных значения расстояний между оптическими модулями Z , радиуса кластера R и расстояния между кластерами H .

Сравнение результатов моделирования различных конфигураций указывает на существенную зависимость эффективного объема регистрации ливней от расстояния между соседними кластерами установки. В правой части рисунка 2.3.3 приводятся зависимости эффективного объема от энергии ливня для трех конфигураций телескопа. Верхняя кривая соответствует случаю, когда границы эффективных объемов кластеров не пересекаются, средняя кривая соответствует расстоянию между кластерами 300 м, нижняя – 200 м. Степень влияния параметра H на величину эффективного объема возрастает с ростом энергии ливня. При энергиях выше 10^6 ГэВ эффективные объемы конфигураций с H равным 200 и 300 метров отличаются в полтора раза.

На основании результатов анализа зависимости эффективного объема и эффективной площади телескопа от значений геометрических параметров в качестве оптимальной была выбрана конфигурация, для которой расстояния между оптическими модулями на гирляндах составляет 15 метров, радиус кластеров 60 метров, а расстояния между кластерами 300 метров (см. рисунок 2.3.4). Детектор располагается в диапазоне глубин 941 – 1276 метров (расстояние нижних ОМ от дна озера около 100 метров).

Выбранная конфигурация телескопа включает в свой состав 2304 оптических модуля и обеспечивает эффективный объем для регистрации

ливней $0,2 - 0,7$ кубических километра в интервале энергий $10^5 - 10^7$ ГэВ, и эффективную площадь для регистрации мюонов $0,2 - 0,5$ квадратных километров в диапазоне энергий $10^4 - 10^6$ ГэВ.

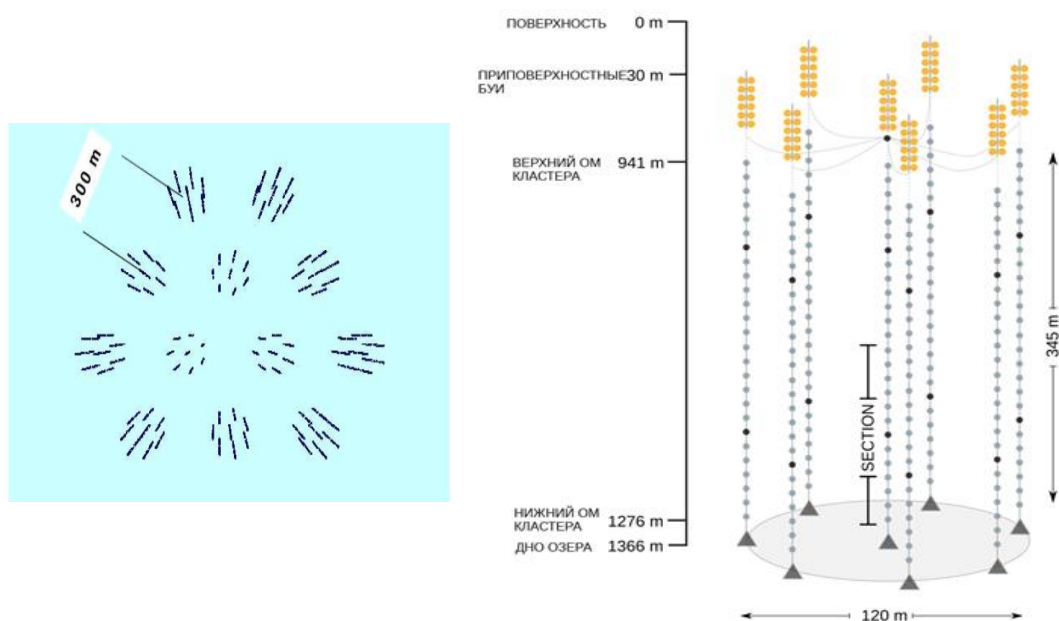


Рис. 2.3.4. Схематическое изображение первой очереди нейтринного телескопа Baikal-GVD: вид сверху на телескоп (слева) и схема кластера установки (справа).

Для базовой конфигурации нейтринного телескопа Baikal-GVD была рассчитана точность восстановления направления движения мюонов и каскадных ливней. С точки зрения задачи реконструкции событий установкой, мюон представляет собой протяженный светящийся трек, ливень – анизотропный точечный источник света. Направление мюонов разыгрывалось равномерно по нижней полусфере, для реконструкции отбирались события, в которых сработало не менее 6 ОМ на трех гирляндах. Ливни разыгрывались равномерно по всей небесной сфере и отбирались события, содержащие не менее десяти сработавших оптических модулей. На рисунке 2.3.5 показаны основные результаты расчетов. Доля события, в которых угол между восстановленным и моделированным направлением движения мюона и каскадного ливня меньше заданной величины $\delta\theta$ представлена в левой части рисунка. Ожидаемое медианное значение

углового разрешения телескопа для мюонов меньше $0,5^\circ$ и слабо зависит от энергии. Точность восстановления направления ливня растет с увеличением энергии и составляет величину около 5 градусов (медианное значение) при усреднении углового разрешения телескопа по спектру E^{-2} .

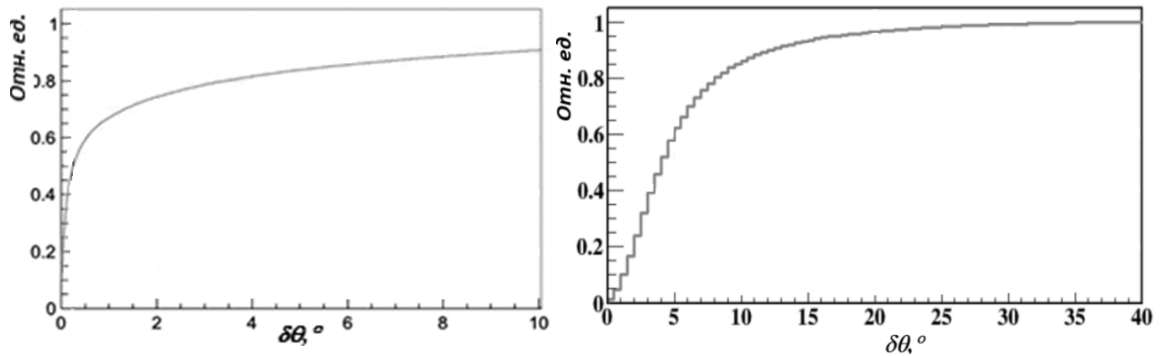


Рис. 2.3.5. Доля событий, в которых угол между заданным при моделировании и восстановленным направлением мюонов с энергией 10 ТэВ (слева) и каскадных ливней при усреднении по спектру E^{-2} (справа) меньше $\delta\theta$.

На рисунке 2.3.6 представлено распределение по расстоянию между заданным и восстановленным центром тяжести ливня и энергетическое разрешение телескопа. Точность восстановления энергии ливня составляет величину 20% -35% в диапазоне энергий 10^4 - 10^7 ГэВ, точность реконструкции координат ливня 2 - 3 метра (медианное значение).

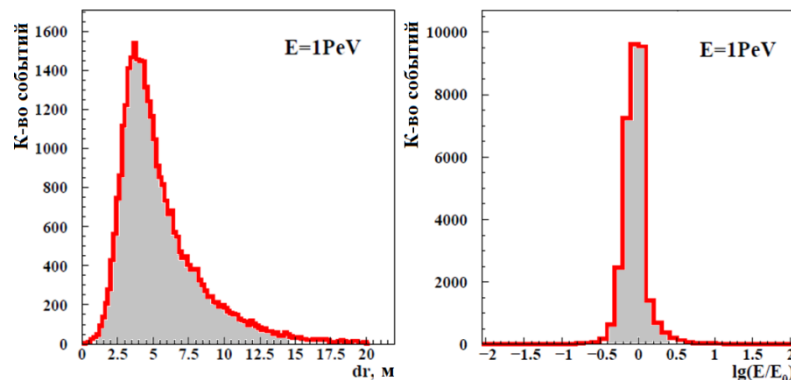


Рис. 2.3.6. Распределения по расстоянию dr между заданным и восстановленным центром тяжести ливня (слева) и энергетическое разрешение телескопа (справа), усреднение по спектру E^{-2} .

На рисунке 2.3.7 представлена зависимость от энергии эффективной площади нейтринного телескопа Baikal-GVD (2304 OM) для регистрации

электронных нейтрино в разных интервалах зенитных углов. При энергиях выше 100 ТэВ на величину эффективной площади начинает оказывать влияние поглощение нейтрино при прохождении сквозь Землю.

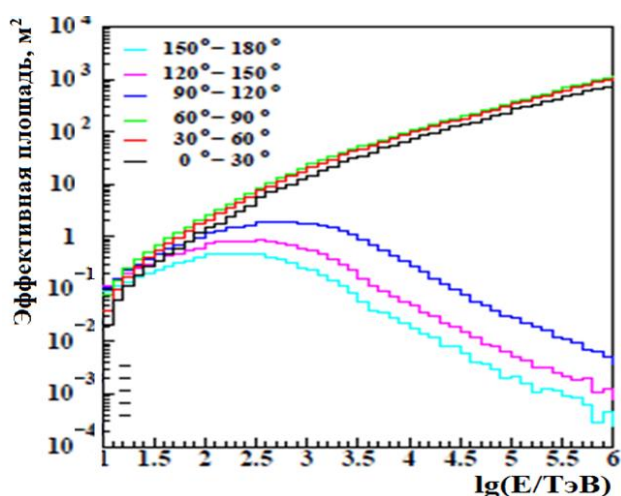


Рис. 2.3.7. Эффективная площадь нейтринного телескопа Baikal-GVD (2304 ОМ) для регистрации электронных нейтрино в разных интервалах зенитных углов.

Выводы к главе 2

Разработка архитектуры и аппаратных средств системы регистрации и сбора данных Baikal-GVD осуществлялась на основании опыта, накопленного при создании и эксплуатации установок НТ200 и НТ200+ Байкальской нейтринной обсерватории (БНО). Экспериментальная база БНО обеспечила возможность в сжатые сроки (2006 – 2011 годы) разработать и исследовать базовые элементы Baikal-GVD: оптические модули, глубоководные модули системы сбора и передачи данных, блоки управления секциями и гирляндами ОМ.

На основании проведенных натурных исследований разработанной регистрирующей аппаратуры и математического моделирования была оптимизирована конфигурация установки и проведены расчеты ее основных параметров: эффективной площади и объема для регистрации мюонов и каскадных ливней, точности восстановления параметров регистрируемых событий.

Базовая конфигурация первой очереди нейтринного телескопа Baikal-GVD состоит из 2304 оптических модулей, сгруппированных в кластеры. Расстояния между кластерами 300 метров, расстояния между ОМ вдоль гирлянды 15 метров. Эффективный объем для регистрации ливней базовой конфигурации составляет 0,2 – 0,7 кубических километра в интервале энергий $10^5 - 10^7$ ГэВ, эффективная площадь для регистрации мюонов 0,2 – 0,5 квадратных километров в диапазоне энергий $10^4 - 10^6$ ГэВ. Точность восстановления энергии ливней составляет величину 20% -35% в зависимости от энергии, точность реконструкции координат ливня 2 - 3 метра. Угловое разрешение телескопа около $0,5^\circ$ для мюонов и $\sim 5^\circ$ для каскадных ливней в области энергий больших 10^2 ТэВ.

Глава 3. Оптический модуль Baikal-GVD

Оптический модуль (ОМ) является основным элементом регистрирующей системы нейтринного телескопа Baikal-GVD. Физические характеристики нейтринного телескопа (угловое и энергетическое разрешение, эффективный объем, порог регистрации) в значительной степени определяются чувствительностью, временными и амплитудными характеристиками ОМ. Оптические модули составляют около 90% от всех глубоководных модулей установки. Объем работ, связанных с подготовкой ОМ для детектора и последующим их монтажом в оз. Байкал, определяет время развертывания телескопа. Поэтому, кроме физических характеристик ОМ, принципиальное значение имеют их конструкция и функциональный состав электроники, что определяет время их сборки, тестирования и монтажа на гирлянды нейтринного телескопа.

3.1. Основные компоненты оптического модуля

Оптический модуль Baikal-GVD [90-92] состоит из глубоководного стеклянного корпуса, фотодетектора (фотоэлектронного умножителя) и блока электроники. Общий вид оптического модуля представлен на рисунке

3.1.1. Фотоэлектронный умножитель с полусферическим фотокатодом размещается в 17-ти дюймовом (42 см), сферическом, глубоководном корпусе VITROVEX из боросиликатного стекла производства фирмы Nautilus Marine Service GmbH (Германия) [93]. Корпус способен выдерживать высокое внешнее гидростатическое давление водной массы, обеспечивает гидрозащиту электроники ОМ и прозрачен для черенковских фотонов. Он состоит из двух идентичных полусфер. На одну полусферу монтируется 5-и штырьковый глубоководный разъём-розетка из нержавеющей стали SUBCONN LPBH5FSS [84] и вакуумный порт. В другую полусферу устанавливается фотоэлектронный умножитель. Через вакуумный порт производится откачка воздуха из ОМ до давления $\sim 0,7$ атм, достаточного для надежной фиксации двух полусфер между собой. После откачки, граница раздела полусфер герметизируется водостойким герметиком.

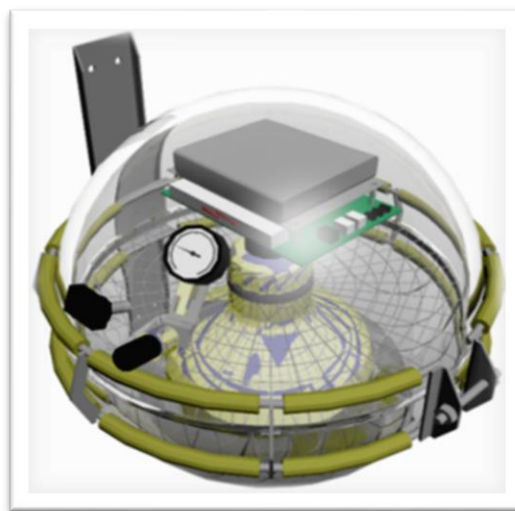


Рис. 3.1.1. *Оптический модуль Baikal-GVD.*

Для снижения потерь излучения вследствие отражений света от границ раздела материалов: корпуса ОМ и колбы ФЭУ, пространство между ФЭУ и стеклянным корпусом заполняется иммерсионным материалом в качестве которого используется силиконовый гель SilGel 612A/B фирмы Wacker-Chemie GmbH [94] (показатели преломления боросиликатного стекла 1,47, силиконового геля 1,404, воды 1,33).

Для уменьшения влияния магнитного поля Земли на работу фотоэлектронного умножителя он защищен экраном, уменьшающим влияние магнитного поля на величину сигнала ФЭУ при его повороте с $\sim 30\%$ до $5 - 8\%$ (в зависимости от места засветки фотокатода: центр или периферийная часть). Магнитный экран представляет собой проволочную сетку (диаметр проволоки 1 мм) с ячейкой 4 см x 4 см, изготовленную из сплава с магнитно-мягкими свойствами – пермаллоя. Сетка отжигается после сварки в атмосфере аргона. Фотография магнитного экрана представлена на рисунке 3.1.2. Характерная величина эффекта затенения фотокатода магнитным экраном составляет величину 5 - 7%.



Рис. 3.1.2. Фотография магнитного экрана - сетки из пермаллоя.

Крепление ОМ к несущему тросу гирлянды осуществляется при помощи рамы из нержавеющей немагнитной стали. Для предотвращения контакта металлических деталей рамы со стеклянным корпусом ОМ используются силиконовые подкладки. Следует отметить, что при креплении ОМ при помощи рамы расстояние от центра фотокатода до оси троса составляет величину около 25 см. Из-за вращения троса неопределенность в положении ФЭУ составляет величину ± 25 см.

В качестве фотодетектора в оптическом модуле используется фотоэлектронный умножитель ФЭУ R7081-100 производства фирмы Hamamatsu [77]. Фотоэлектронный умножитель оснащен полусферическим фотокатодом диаметром 25 см с квантовой эффективностью $\sim 35\%$ и 10-

динодной системой усиления (см. рисунок 3.1.3). Основные характеристики ФЭУ представлены в таблице 3.1.1.

При поставке фотоэлектронных умножителей фирма-производитель предоставляет паспорт на каждый индивидуальный прибор. В паспорте представлены характеристики ФЭУ, основными из которых являются:

- величина высоковольтного напряжения, обеспечивающего усиление динодной системы ФЭУ на уровне 10^7 (HV);
- отношение пик-долина одно-фотоэлектронного распределения ФЭУ (P/V);
- разброс времен пролета фотоэлектронов в камере ФЭУ (TTS);
- темновая скорость счета (*Dark Counts*);
- квантовая эффективность фотокатода в максимуме спектральной характеристики (Q_{max}).

На рисунках 3.1.4 - 3.1.6 представлены распределения выборочной партий фотоэлектронных умножителей по этим параметрам.

Таблица 3.1.1. Спецификация ФЭУ R7081-100 [77]

Характеристика	Значение
Диаметр колбы	254 мм (10")
Область спектральной чувствительности	300 – 650 нм
Характерная квантовая эффективность фотокатода (в максимуме ~ 400 нм)	35 %
Ток фотокатода от вольфрамовой лампы накаливания 2856 К, проходящий через синий светофильтр с максимумом пропускания при 400 нм.	13,5 мкА / Лм
Характерное усиление	$1,0 \times 10^7$
Ток анода от вольфрамовой лампы накаливания 2856 К.	1300 А/Лм
Характерное напряжение, обеспечивающее усиление 10^7	1500 В
Максимальное напряжение (до пробоя).	2000 В
Система динодов	Коробчатая линейная,

	10 динодов
Уровень собственных шумов (при 25° С)	8000 Гц
Разброс времен пролета фотоэлектронов в камере ФЭУ (FWHM)	3,4 нс
Отношение пик-долина	2,8
Анодный ток после 30 минутного хранения в полной темноте.	500 нА (характерный) 1000 нА (максимум)
Рабочий диапазон температур	- 30°С ...+ 50° С
Время нарастания анодного импульса с 10 % до 90 % от пиковой амплитуды в условиях равномерного освещения фотокатода.	3,8 нс
Время пролета электрона (от момента рождения фотоэлектрона до достижения выходного импульса пиковой амплитуды).	62 нс
Разброс времени пролёта (FWHM).	3,4 нс
Диапазон линейности.	40 мА (2 % уровень) 60 мА (5 % уровень)

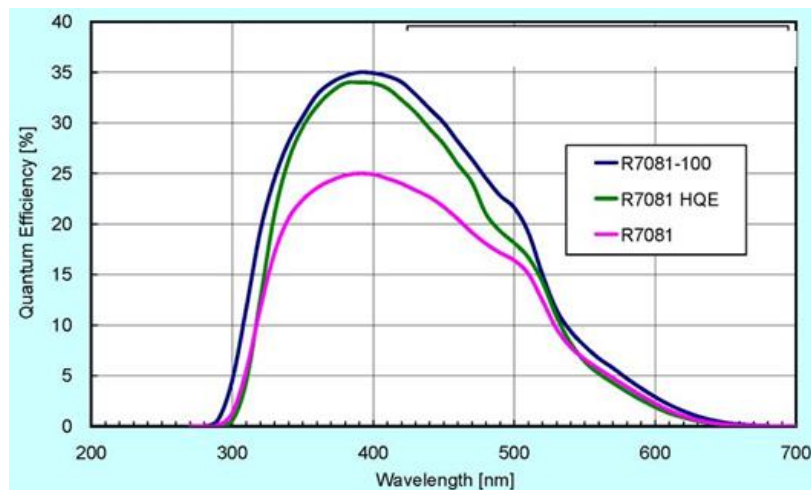


Рис. 3.1.3. Внешний вид ФЭУ НАМАМАТСУ R7081-100 и зависимость квантовой эффективности фотокатода от длины волны.

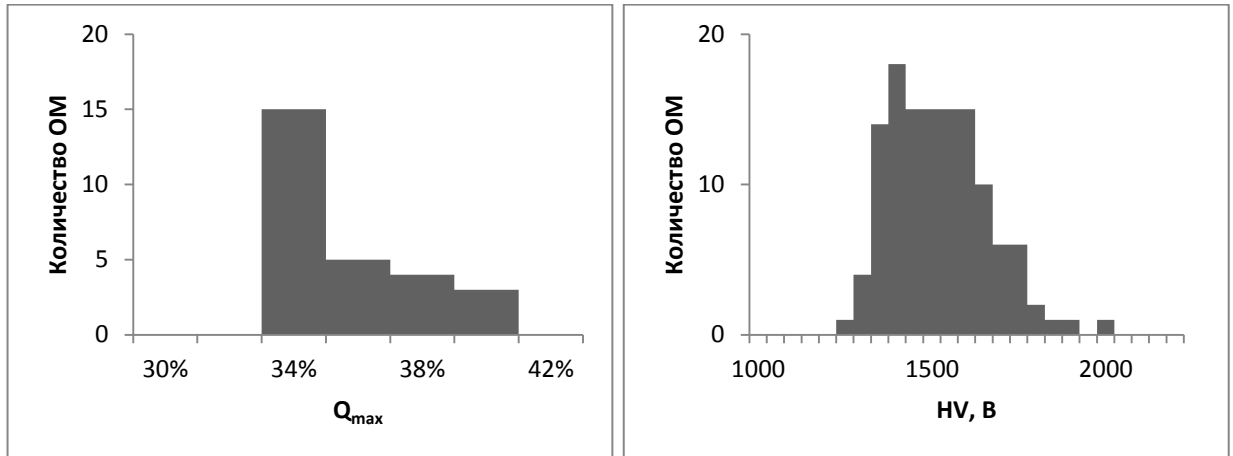


Рис. 3.1.4. Распределения фотоэлектронных умножителей по параметрам Q_{max} (слева) и HV (справа).

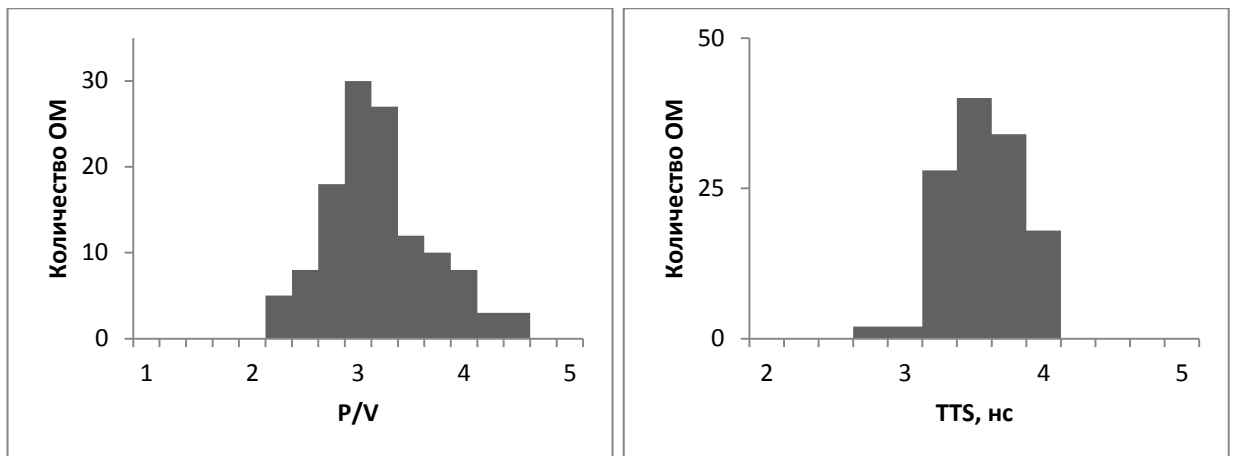


Рис. 3.1.5. Распределения фотоэлектронных умножителей по параметрам P/N (слева) и TTS (справа).

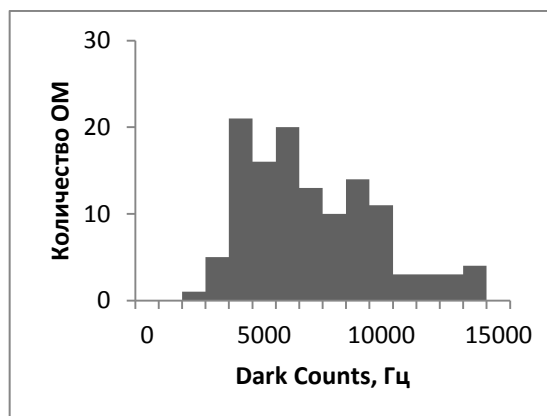


Рис. 3.1.6. Распределения фотоэлектронных умножителей по темновой скорости счета (Dark Counts).

Блок электроники оптического модуля устанавливается непосредственно на цоколь ФЭУ, который способен удерживать до 2 кг нагрузки (общий вес блока электроники ОМ составляет $\sim 0,8$ кг). Связь электронного блока с модулем центра секции осуществляется через глубоководный 5-контактный разъем, на котором устанавливается коммутационная плата с клеммными соединителями и высокочастотным коаксиальным разъемом (SMA). Через коаксиальный разъем передается аналоговый сигнал с ФЭУ, через клеммные соединители – электропитание и сигналы управления RS-485 (в разьеме объединены экран коаксиала и заземление электропитания).

В состав блока электроники ОМ входят источник высоковольтного напряжения, плата ФЭУ, содержащая пассивный делитель напряжений и усилитель сигналов ФЭУ, контроллер и калибровочные светодиоды. Внешний вид блока электроники ОМ представлен на рисунке 3.1.7.



Рис. 3.1.7. Блок электроники ОМ, установленный на цоколе ФЭУ.

Блок-схема электроники ОМ представлена на рисунке 3.1.8. Источник высоковольтного напряжения TRACO POWER PHV12-2.0K2500P (Япония) [83] обеспечивает электропитание делителя ФЭУ напряжением положительной полярности (максимальный выходной ток 1 мА). Выбранный источник имеет низкий уровень шумов (8 мВ пик-пик, полоса частот ~ 20 MHz) и обладает высокой стабильностью выходного напряжения (0,05 %), величина которого может устанавливаться в диапазоне от 0 до 2,5 кВ при помощи управляющего напряжения в диапазоне 0 – 2,5 В с

шагом ~ 1 мВ. Это обеспечивает точность подбора рабочего напряжения ФЭУ не хуже 1 В.

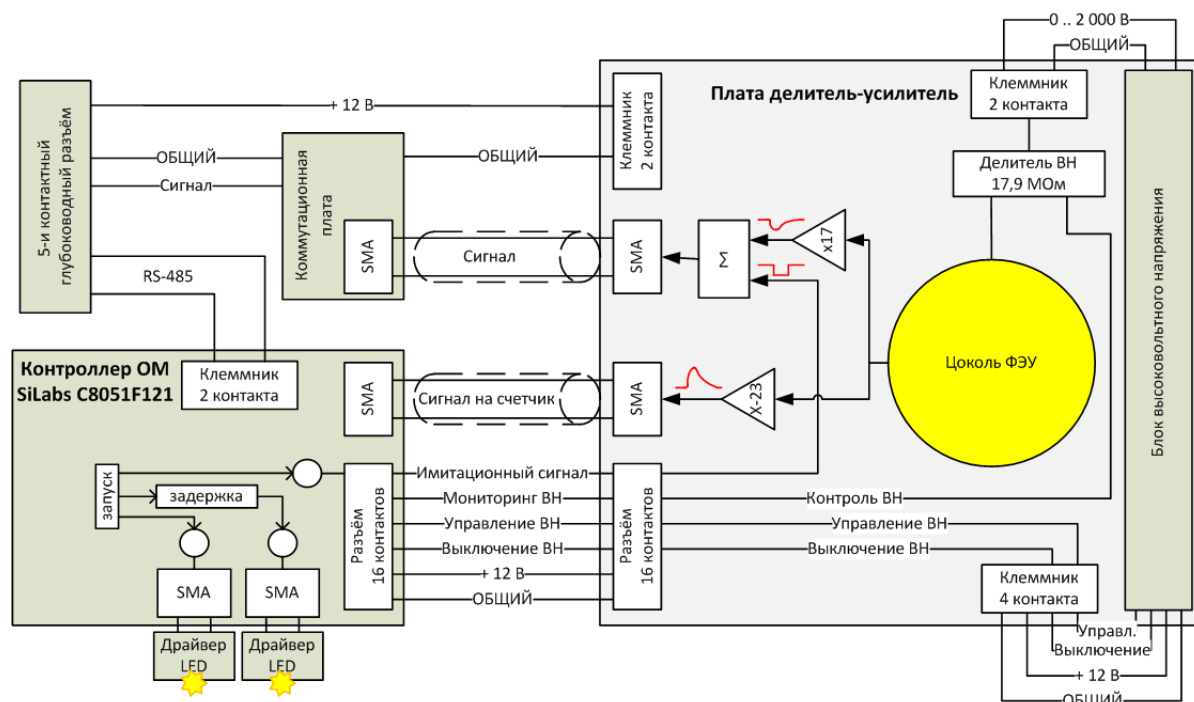


Рис. 3.1.8. Блок-схема электроники ОМ.

Чтобы исключить разность потенциалов между анодом ФЭУ и внешней электроникой (усилителем) традиционно используется делитель напряжения с заземленным анодом и высоким отрицательным напряжением на фотокатод. Однако, в случае использования ФЭУ под водой, применение такой схемы приводит к увеличению уровня шумов. Поэтому практически во всех нейтринных экспериментах (за исключением KM3Net) используется схема подключения делителя с заземленным фотокатодом и высоким положительным напряжением на аноде. Схема с заземленным фотокатодом используется и в Байкальском эксперименте. Для изоляции высоковольтного напряжения применяется разделительный конденсатор.

Делитель напряжения и усилитель сигналов ФЭУ размещены на одной плате (см. рисунок 3.1.9). На плате также устанавливается разъем для подключения ФЭУ (E678-20В). Напряжения между динодами ФЭУ выбирались в соответствии с рекомендациями фирмы-производителя. Схема

делителя напряжения представлена на рисунке 3.1.10. Полное сопротивление делителя составляет 18 МОм.



Рис. 3.1.9. Плата делителя и усилителя сигналов ФЭУ.

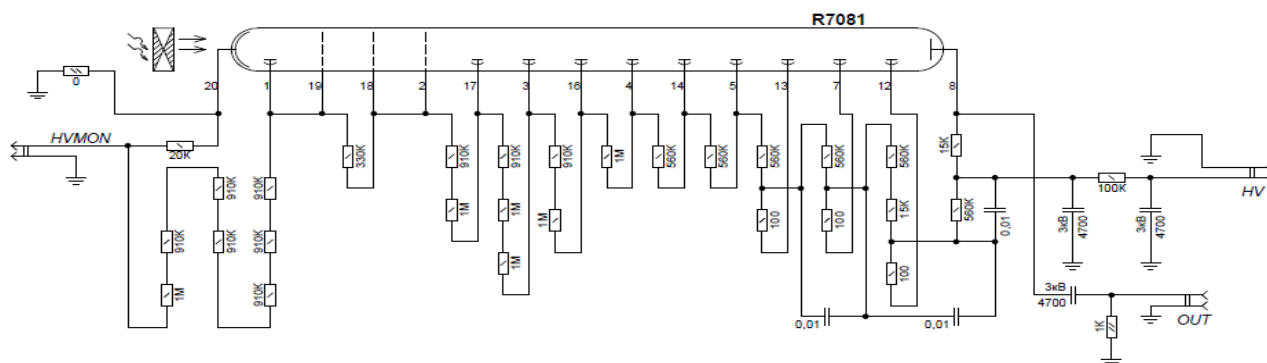


Рис.3.1.10. Схема делителя напряжений диодной системы ФЭУ.

Для достижения требуемой величины одно-фотоэлектронной (о.ф.э.) амплитуды 25 – 30 мВ, сигнал с ФЭУ усиливается. Схема усилителя представлена на рисунке 3.1.11. Усилитель включает в свой состав два канала. С первого (спектрометрического) канала с коэффициентом усиления ~ 14 сигналы подаются на вход АЦП. Общий коэффициент усиления канала составляет величину $\sim 10^8$ (усиление ФЭУ $\sim 10^7$, ослабление в 90-метровом глубоководном кабеле $\sim 0,7$, коэффициент преобразования усилителя ~ 14). Длительность переднего фронта сигналов усилителя оптимизирована для работы с АЦП с частотой дискретизации 200 МГц и составляет величину ~ 10 нс. Второй канал инвертирует сигналы ФЭУ и усиливает их в ~ 20 раз. Эти сигналы поступают на счетчик шумовых импульсов контроллера ОМ.

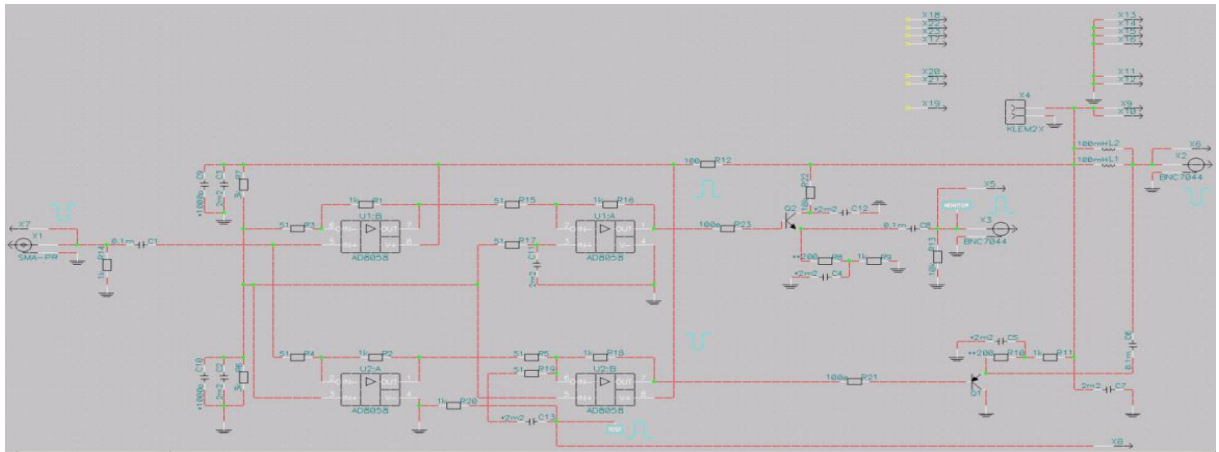


Рис. 3.1.11. Схема усилителя сигналов ФЭУ.

Важной функцией электроники ОМ является амплитудная и временная калибровка каналов, позволяющая преобразовывать измеренные параметры сигналов в количество фотоэлектронов и время их регистрации. Калибровочная система ОМ реализована на основе двух светодиодных источников света (Kingbright L7113 PBC-A, длина волны 470 нм в максимуме излучения) и генератора, имитирующего сигналы ФЭУ (тестовые импульсы). Светодиоды в оптическом модуле направлены вверх относительно фотокатода ФЭУ. Такая геометрия обеспечивает примерно равную засветку фотоэлектронных умножителей, расположенных в оптическом модуле, формирующем светодиодные вспышки, и в ОМ, закрепленном выше по тросу на гирлянде.

Внешний вид и электрическая схема светодиодного калибровочного источника (СКИ) представлены на рисунке 3.1.12. Его принцип работы основан на подходе, предложенном в работе [95]. Для управления работой СКИ используется один провод, по которому передается управляющее напряжение (0 – 12 В) на конденсатор СКИ и сигнал запуска. Передний фронт сигнала запуска открывает транзисторный ключ, инициируя разрядку конденсатора через светодиодный источник. Интенсивность светового импульса определяется величиной напряжения на управляющем конденсаторе. Помимо регулировки интенсивности световых вспышек

каждого из светодиодов предусмотрена возможность регулировки задержки между их импульсами в диапазоне от 0 до 1000 нс с шагом ~ 100 нс.

Светодиодная калибровочная система ОМ позволяет контролировать диапазон линейности измерительных каналов. При этом применяется методика, не требующая использования источников света с линейными характеристиками. Для проверки линейности анализируется параметр $R = Q(L1+L2) / (Q(L1)+Q(L2))$, где $Q(L1)$ и $Q(L2)$ – заряды сигналов, измеренные при подсветке ФЭУ поочередно первым и вторым светодиодом, а $Q(L1+L2)$ – заряд, измеренный при подсветке одновременно двумя светодиодами ОМ. В области линейности величина параметра R должна быть равна единице (систематическая ошибку определяется величиной перекрестных наводок каналов).

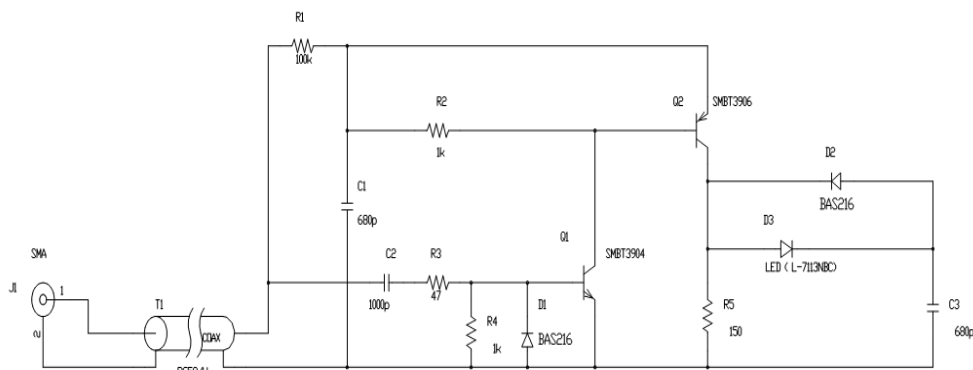
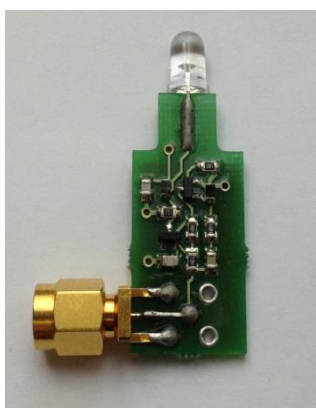


Рис. 3.1.12. Фотография и электрическая схема светодиодного калибровочного источника оптического модуля.

Управление работой аппаратуры оптических модулей осуществляется при помощи специализированного контроллера (*контроллер ОМ*), разработанного на основе микроконтроллера SiLabs C8051F121. Контроллер ОМ обеспечивает регулировку высоковольтного напряжения на делителе ФЭУ, управляет частотой и интенсивностью вспышек калибровочных светодиодов, позволяет измерять частоту шумовых импульсов канала,

величину напряжений электропитания, температуру внутри ОМ. Внешний вид и функциональная схема контроллера представлены на рисунке 3.1.13.

Контроллер включает в свой состав 4 канала ЦАП для управления величиной высоковольтного напряжения ФЭУ, амплитудой сигналов двух светодиодов и порогом компаратора счетчика шумов ФЭУ. Для мониторинга устанавливаемых значений параметров и напряжений питания в контроллере предусмотрены шесть каналов АЦП. Обмен данными с контроллером осуществляется по шине управления, организованной на базе интерфейса RS-485. Каждый контроллер имеет свой сетевой адрес, по которому осуществляется обмен командами и данными. Скорость обмена может регулироваться: 9600 бод (отладочный режим), 115200 бод (штатный режим работы в телескопе). Список команд управления хранится в постоянной энергонезависимой памяти контроллера. Обращение к контроллерам, подключенным к одной линии, происходит последовательно, так же, как и приём данных от них.

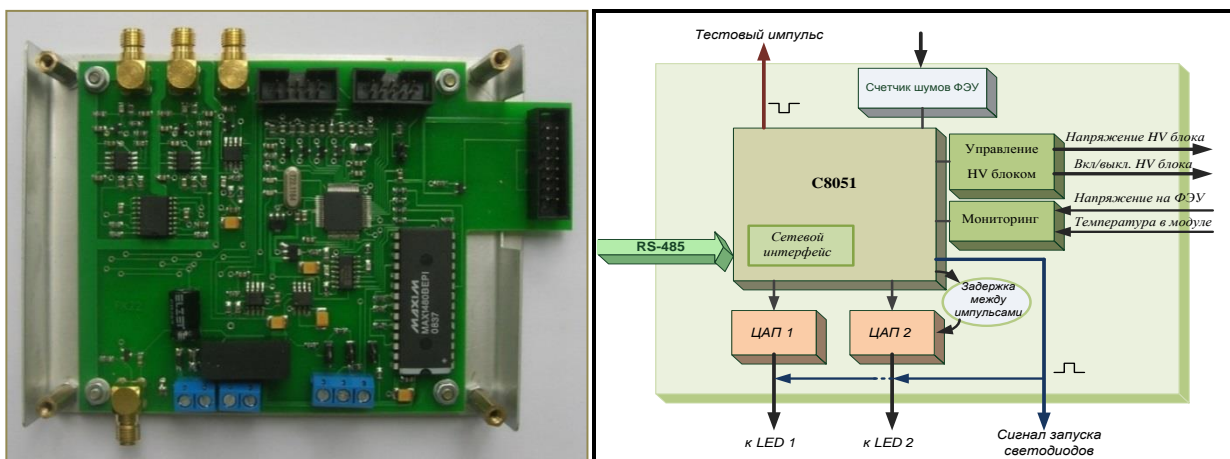


Рис. 3.1.13. Внешний вид и функциональная схема контроллера ОМ.

Сигнал, синхронизированный с моментом запуска светодиодов, выводится на отдельный разъем контроллера для проведения лабораторных испытаний аппаратуры. Кроме того, одновременно с сигналом запуска светодиодов контроллер имеет возможность формировать сигнал, имитирующий импульс ФЭУ (*тестовый импульс*). Измерение времени между тестовым импульсом и сигналом, поступающим с ФЭУ, позволяет определять задержку сигналов в

фотоэлектронном умножителе, которая используется для временной калибровки каналов. Тестовые импульсы позволяют также тестировать как отдельные каналы, так и систему сбора данных телескопа в целом без включения высоковольтных напряжений ФЭУ. Амплитуда тестового импульса составляет 500 мВ (полярность отрицательная), длительность 90 нс.

Основные параметры оптического модуля Baikal-GVD представлены в таблице 3.1.2. ОМ характеризуется типом и размерами глубоководного корпуса, параметрами фотодетектора, параметрами выходных сигналов, набором функций систем калибровки и мониторинга, эксплуатационными параметрами.

Таблица 3.1.2. Основные параметры ОМ Baikal-GVD

Характеристика	Значение
Корпус	VITROVEX 17"
Разъем	SUBCONN LPBH5FSS (5 конт.)
Иммерсионный материал	2-хкомпонентный силиконовый гель WACKER SilGel® 612 A/B
Фотодетектор	ФЭУ R7081-100 (Hamamatsu)
Количество ФЭУ	1
Характеристики ФЭУ: квантовая чувствительность	35 %
диаметр фотокатода	254 мм
минимальная эффективная область	Ø 220 мм
область спектральной чувствительности	300 – 650 нм
временное разрешение (TTS)	3,4 нс
уровень собственных шумов	8 кГц
номинальное напряжение (усиление 10^7)	1500 В
сопротивление делителя напряжения	18 МОм
Параметры выходного сигнала: передний фронт	12 нс

длительность импульса	25 нс (в области линейности)
одно-фотоэлектронная амплитуда	25 – 30 мВ
Энергопотребление при напряжении на делителе 1500 В	200 мА × 12 В
Калибровочная система: количество светодиодов	2
тип светодиодов	Kingbright L7113 PBC-A
длина волны в максимуме	470 нм
диапазон регулировки интенсивности излучения	0 – 10 ⁸ фотонов на вспышку
диапазон регулировки задержек светодиода	0 – 1000 нс
уровень наводок с канала на канал	< 1 %
Система мониторинга:	Контроль напряжения на ФЭУ, скорости счета шумов, температуры и напряжений электропитания
Способ монтажа	Рама из нержавеющей стали
Температура эксплуатации	-20 ... +40 °С
Температура хранения	-40 ... +40 °С

3.2. Исследования характеристик оптических модулей

Программа исследований характеристик оптических модулей включала в себя измерение параметров отдельных компонент ОМ, измерения зависимости отклика ОМ от угла падения света и исследования временных, амплитудных и шумовых характеристик измерительных каналов ОМ. Для проведения исследований был создан набор лабораторных стендов, позволяющих измерять как параметры отдельных компонент оптических модулей (усилителей, кабельных соединений, светодиодных калибровочных источников, ФЭУ), так и характеристики ОМ в целом. Помимо проведения комплексных исследований аппаратуры, стендовое оборудование использовалось для тестирования и калибровки оптических модулей и их

компонент в процессе массового производства и подготовки к монтажу в оз. Байкал.

Характеристики усилителя. Для измерения характеристик усилителя оптического модуля использовался лабораторный стенд на основе цифрового осциллографа LeCroy (частота дискретизации 1 ГГц). На рисунке 3.2.1 показан пример осциллограмм сигналов усилителя, измеренных на его входе (желтый сигнал), спектрометрическом выходе (синий) и мониторингом выходе (красный). Передние фронты выходных сигналов составляют величину около 11 нс. Такая длительность переднего фронта обеспечивает измерение напряжения сигнала в области переднего фронта как минимум в двух точках (один временной отсчет АЦП составляет 5 нс), что позволяет измерять время его регистрации с точностью лучшей 2 нс. Аналогичные временные параметры имеет и задний фронт импульса, формируя однофотонный сигнал длительностью около 25 нс, что обеспечивает надежное измерение его заряда. Аналогичные осциллограммы снимались для всех экземпляров усилителей, устанавливаемых в оптических модулях. На основании этих измерений формировался архив данных, содержащих основные характеристики этих устройств: коэффициенты усиления и временные параметры каналов.

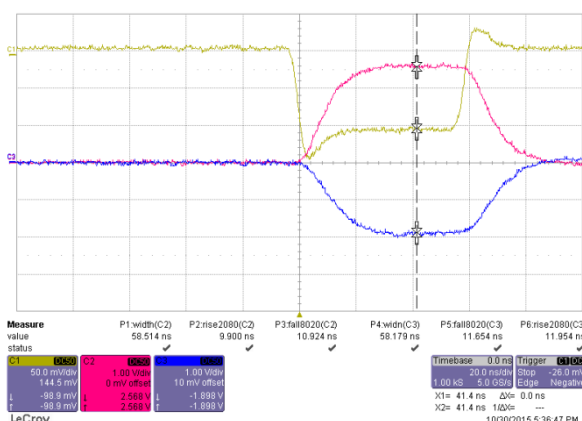


Рис. 3.2.1. Осциллограмма входного и выходных сигналов усилителя оптического модуля.

Типовые амплитудные характеристики усилителя показаны на рисунке 3.2.2. На нем представлены зависимости амплитуды, длительности и заряда выходных сигналов от амплитуды входных сигналов, имитирующих сигнал с ФЭУ (ширина сигнала на полувысоте ~ 15 нс).

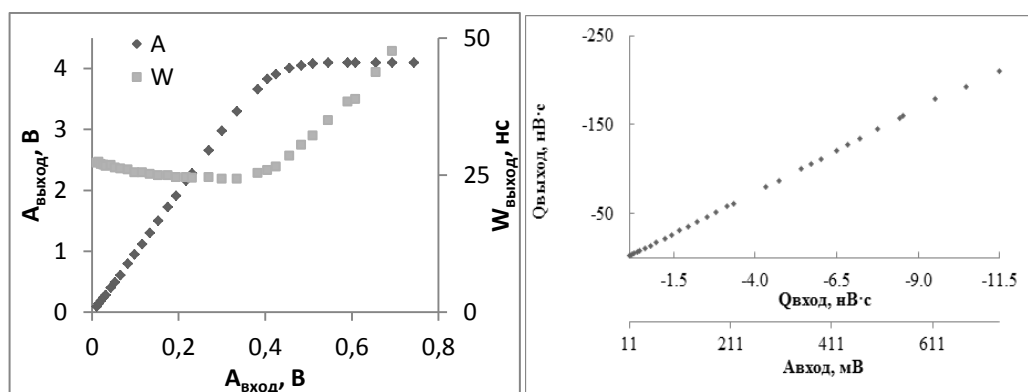


Рис. 3.2.2. Типовые зависимости амплитуды (A) ширины (W) и заряда (Q) выходного сигнала усилителя от амплитуды входного сигнала.

Усилитель ограничивает выходной сигнал на уровне 4 В, приводя его в соответствие с рабочим диапазоном АЦП. Это ограничивает диапазон линейности усилителя по амплитуде. Диапазон линейности по заряду составляет ~ 150 нВ·с (нагрузка 50 Ом), что соответствует ~ 250 ф.э., регистрируемых фотоэлектронным умножителем. Задержка усилителя ~ 12 нс.

Форма импульсов сигналов ОМ. На форму и амплитуду выходных импульсов ОМ помимо усилителя влияет также глубоководный кабель, соединяющий ОМ и модуль АЦП (длина кабеля 90 метров). В состав кабеля оптического модуля КСТ(РК50+9×0.15) входит коаксиальный проводник РК50 и медные жилы для электропитания и управления работой ОМ. Кабель ОМ изготавливается специально для Байкальского эксперимента заводом “Псковгеокабель”. На рисунке 3.2.3 представлены формы импульсов с оптического модуля после прохождения через глубоководный кабель, соответствующих сигналам с зарядами 1, 20, 50 и 10^3 ф.э. В линейной области длительность сигнала на половине высоты составляет величину

около 30 нс. В нелинейной области работы измерительного канала ($>10^2$ ф.э.) форма сигнала определяется процессами, связанными с насыщением анодного тока ФЭУ и ограничением амплитуды усилителем сигналов.

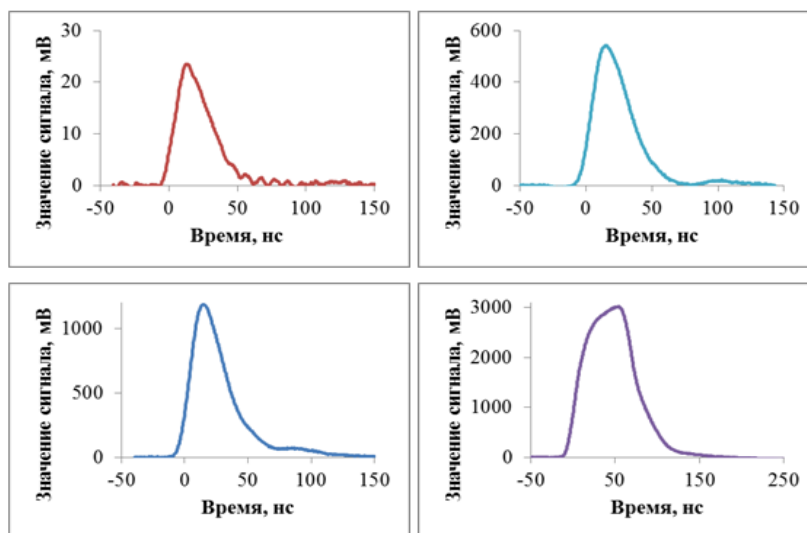


Рис. 3.2.3. Формы выходных импульсов ОМ после прохождения через 90-метровый глубоководный кабель для сигналов с зарядами 1, 20, 50 и 10^3 ф.э.

Светодиодный калибровочный источник оптического модуля (СКИ) включает в себя два светодиода, работающих в импульсном режиме, и управляющую электронику, позволяющую изменять количество фотонов в импульсе независимо для каждого светодиода. Характеристики светодиодного источника ОМ измерялись при помощи быстрого фотоэлектронного умножителя Photonis XP1911. Исследовались временные параметры каналов светодиодного источника (время нарастания и длительность импульса), амплитудные характеристики (количество излучаемых в импульсе фотонов) и взаимное влияние каналов светодиодов друг на друга. На рисунке 3.2.4 представлены временные характеристики выборочной партии СКИ. Длительность переднего фронта светового импульса составляет в среднем величину менее 3 нс, а длительность импульса на половине высоты 5 – 7 нс. Типичная зависимость светимости одного канала СКИ от величины управляющего напряжения представлена в

левой части рисунка 3.2.5. В диапазоне напряжений от 5 В до 11 В количество фотонов во вспышке меняется от 1 до $\sim 10^8$. Эту зависимость можно с хорошей точностью аппроксимировать функцией вида:

$$\text{Log}_{10}(L) = \frac{u-a}{b_0+b_1(u-a)+b_2(u-a)^2}, \quad (3.1)$$

где L – количество фотонов во вспышке, u – величина управляющего напряжения в Вольтах.

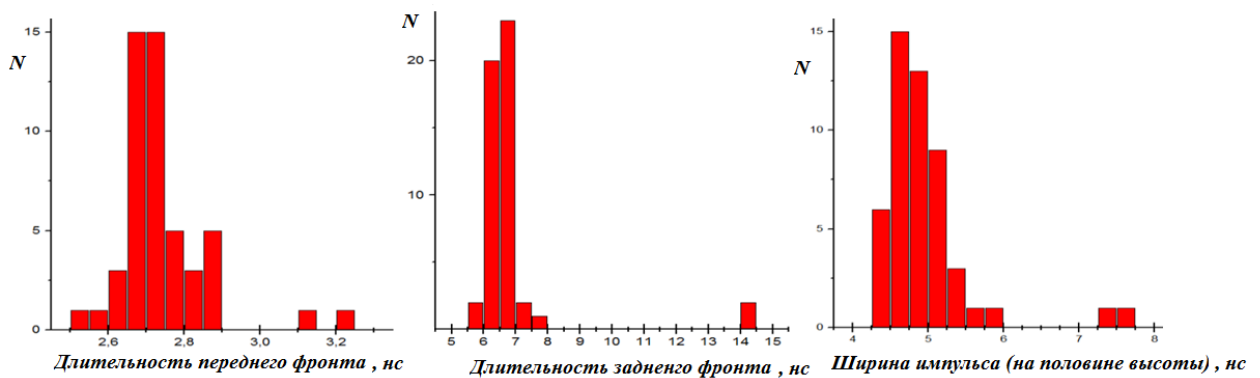


Рис. 3.2.4. Распределение импульсов от калибровочных светодиодных источников ОМ по длительности переднего фронта ($T_{нф}$), заднего фронта ($T_{зф}$) и ширине импульсов на половине высоты ($T_{имп}$).

При максимальной интенсивности вспышки сигнал от СКИ может быть зарегистрирован в байкальской воде оптическим модулем, находящимся на расстоянии $\sim 10^2$ метров от источника. Возможность регулировки яркости светодиодов в широком диапазоне позволяет проводить измерения амплитудных градуировочных характеристик оптических модулей. Для этого проводятся серии измерений, в которых регистрируются поочередно заряды сигналов, инициированных первым каналом СКИ, вторым каналом и двумя каналами одновременно, и применяется итерационный процесс, в котором величины зарядов вспышек первого и второго каналов СКИ подбираются равными заряду от одновременной вспышки двух светодиодов. Ошибка измерения градуировочной функции ОМ определяется количеством итераций, точностью подбора требуемых величин зарядов выходных импульсов светодиодов и взаимным влиянием каналов друг на друга

(перекрестными наводками). Для оценки величины перекрестных наводок светодиодных каналов измерялся параметр r :

$$r = \frac{Q(u_1, u_2=0) - Q(u_1, u_2=u_1)}{Q(u_1, u_2=0)}, \quad (3.2)$$

где $Q(u_1, u_2)$ – средний заряд сигналов с ФЭУ, инициированных двумя светодиодами с управляющими напряжениями u_1 и u_2 при условии, что второй светодиод оптически изолирован от фотокатода ФЭУ. В правой части рисунка 3.2.5 представлено измеренное значение параметра r для одного из светодиодных источников как функция количества излучаемых фотонов. Как видно из рисунка, величина перекрестных наводок между каналами светодиодов существенно меньше 1% и они не оказывают влияния на точность измерения градуировочной характеристики оптического модуля.

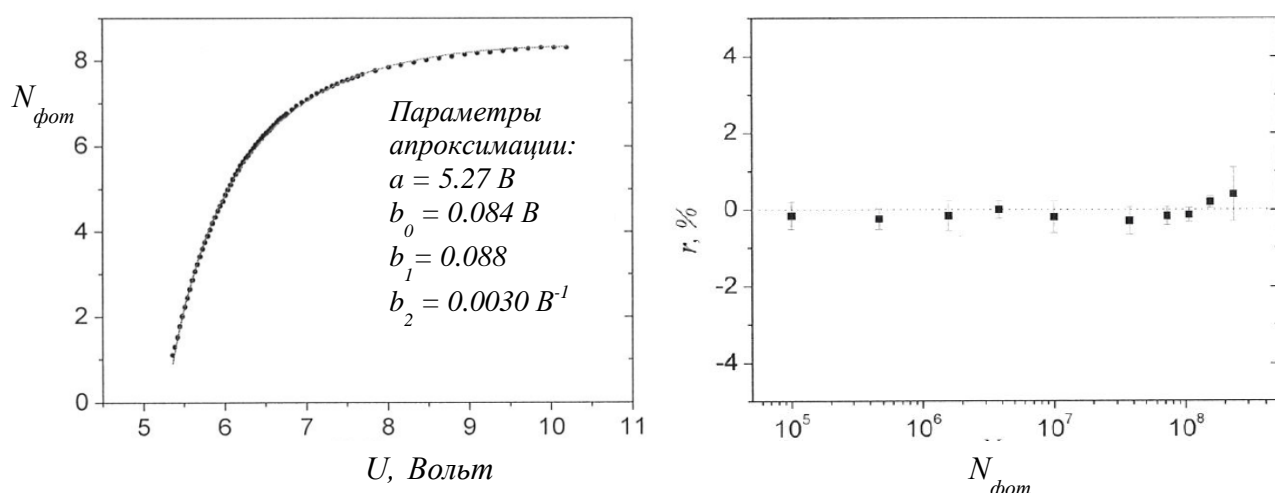


Рис. 3.2.5. Зависимость количества фотонов в импульсе светодиодного калибровочного источника от величины управляющего напряжения (слева) и величина перекрестных наводок между каналами двух светодиодов в зависимости от интенсивности их сечения.

Характеристики оптических модулей

Процедура измерения характеристик оптических модулей была разработана с учетом необходимости паспортизации всех ОМ, которые войдут в состав нейтринного телескопа. Учитывая их значительное количество (более 2000 ОМ только на первом этапе развертывания

установки) процедура измерений была полностью автоматизирована (проведение измерений “вручную” осуществлялось только для выборочных экземпляров ОМ в целях отладки методики измерений и их алгоритмов). Данные, полученные в результате автоматизированных измерений параметров ОМ, заносились в таблицы EXCEL для их последующего статистического анализа и занесения в базу данных оптических модулей.

Программа измерения характеристик ОМ включала в себя следующие основные процедуры:

- измерение зависимости параметров оптического модуля от величины высоковольтного напряжения;
- измерение характеристик ОМ при регистрации слабых световых сигналов (одно-фотоэлектронный режим работы ФЭУ);
- измерение зависимости параметров ОМ от уровня подсветки ФЭУ (много-фотоэлектронный режим работы ФЭУ);
- измерение параметров вспомогательных систем ОМ: формирователя тестовых импульсов и счетчика срабатываний канала;
- измерение параметров послеимпульсов;
- измерение амплитудной градуировочной характеристики оптического модуля.

Измерительная система стенда для исследования характеристик ОМ была организована на базе цифрового осциллографа HDO 4034 компании Teledyne LeCroy с встроенным компьютером, работающим под управлением операционной системы семейства Windows (полоса пропускания 350 МГц, частота дискретизации до 2,5 ГГц). Оптические модули устанавливались в светоизолированный, экранированный от электромагнитного излучения силовой сети (50 Гц) бокс, вмещающий до 4-х ОМ одновременно, и подключались к входам осциллографа 90-метровыми глубоководными кабелями, аналогичными применяемым в Байкальском телескопе. Для

измерения параметров ОМ использовались импульсные светодиодные источники, установленные в исследуемых модулях.

Управление работой оптических модулей осуществлялась встроенным компьютером осциллографа по последовательному интерфейсу RS-485 через 1-портовой асинхронный сервер NPort 5150 по сети Ethernet. Стенд оснащен Ethernet-модулем ввода/вывода ioLogik E1214 с шестью дискретными вводами и шестью реле. По одному каналу модуля осуществлялось удаленное управление электропитанием и инициализация контроллеров ОМ. Через другой канал включалось электропитание аппаратуры, управляющей работой стенда. Устройство ioLogik E1214 имеет встроенный 2-портовый Ethernet-коммутатор, что позволяет объединить его в цепочку с устройством NPort 5150 и подключать оба устройства к одному порту LAN осциллографа. Второй порт LAN осциллографа был подключен к сети Internet, что обеспечило возможность удаленного управления работой стенда. Программное обеспечение стенда было разработано в среде Microsoft Visual Basic for Application 7.0, входящей в состав Microsoft Excel.

Перед проведением серии калибровочных измерений оптические модули выдерживались в темноте при включенном высоковольтном напряжении, вплоть до снижения собственных шумов до уровня ~ 10 кГц. На первом этапе измерений осуществлялся подбор напряжения на делителе ФЭУ, обеспечивающего усиление измерительного канала ОМ (в дальнейшем – канала) на уровне $\sim 10^8$. Эта величина соответствует коэффициенту усиления диодной системы ФЭУ $\sim 10^7$. Коэффициенты усиления каналов определялись на основании анализа одно-фотоэлектронных (о.ф.э.) зарядовых спектров ФЭУ. О.ф.э. спектры измерялись в режиме подсветки фотокатода импульсным светодиодным источником ОМ. Вероятность регистрации сигнала от светодиода подбиралась на уровне $\sim 5\%$ при пороге регистрации ~ 0.2 средней о.ф.э. амплитуды. При этом условии вклад многоэлектронных импульсов в общее количество зарегистрированных

сигналов не превышает трех процентов. Измерения проводились в режиме запуска осциллографа от генератора импульсов светодиодов. Для оценки величины пьедестала и доли шумовых импульсов в о.ф.э. спектре аналогичные измерения проводились при выключенном источнике света. Характерный о.ф.э. спектр и распределение ОМ по величине о.ф.э. разрешения представлены на рисунке 3.2.6 для партии из 80 оптических модулей. Первый пик в левой части рисунка 3.2.6 соответствует распределению величины пьедестала, второй пик - распределению одноэлектронных импульсов ФЭУ. О.ф.э. разрешение определялось как отношение стандартного отклонения распределения к среднему значению.

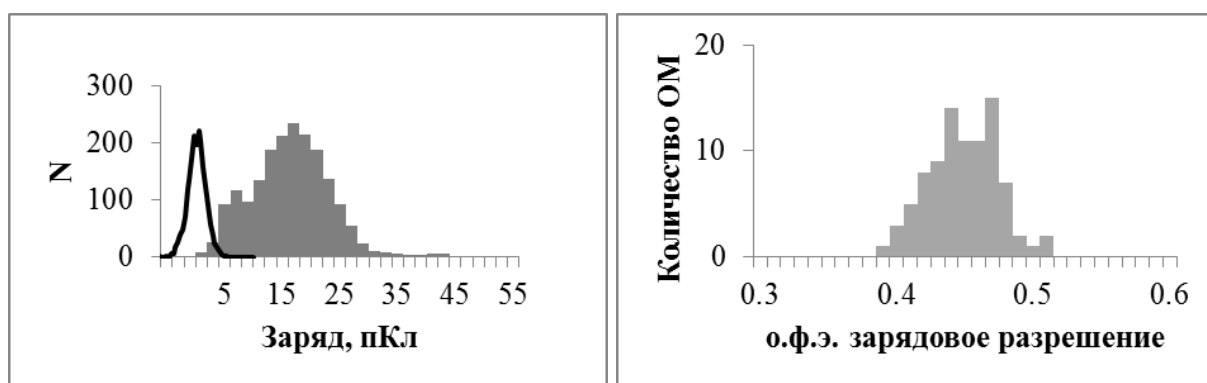


Рис. 3.2.6. Характерное о.ф.э. зарядовое распределение при коэффициенте усиления ФЭУ $\sim 1 \times 10^7$ и распределение пьедестала (слева), распределение ОМ по величине о.ф.э. разрешения (справа).

На рисунке 3.2.7 представлены зависимости коэффициентов усиления каналов от напряжения на делителе ФЭУ и распределение каналов по подобранному коэффициенту усиления. Усиление каналов на уровне $\sim 10^8$ достигается при величине напряжения в диапазоне от 1150 В до 1750 В для исследованной партии ФЭУ.

Временное разрешение ОМ определялось как стандартное отклонение распределения времен регистрации сигналов в одно-фотоэлектронном режиме работы ФЭУ (время регистрации сигналов определялось на уровне половины амплитуды импульсов). Типичный временной спектр для одного

ОМ и распределение ОМ по величине временного разрешения представлены на рисунке 3.2.8.

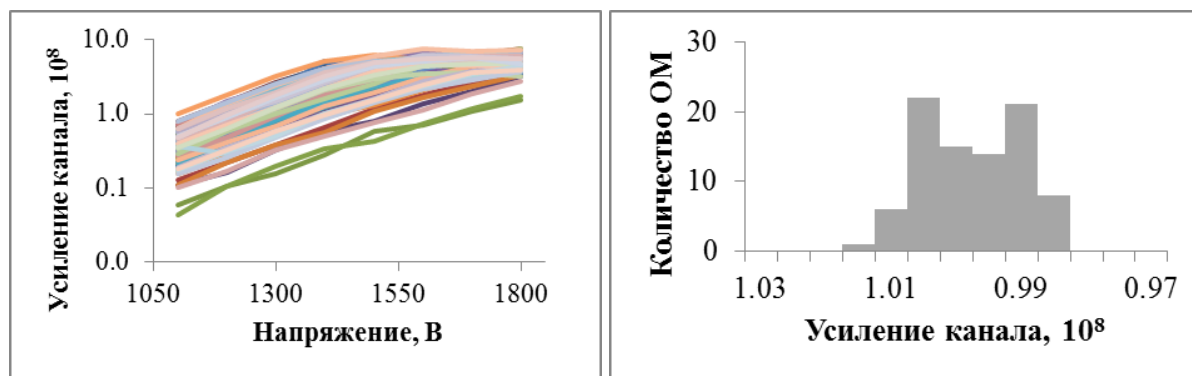


Рис. 3.2.7. Зависимости коэффициентов усиления ОМ от величины напряжения на ФЭУ для одной партии ОМ (слева) и распределение ОМ по величине подобранного коэффициента усиления (справа).

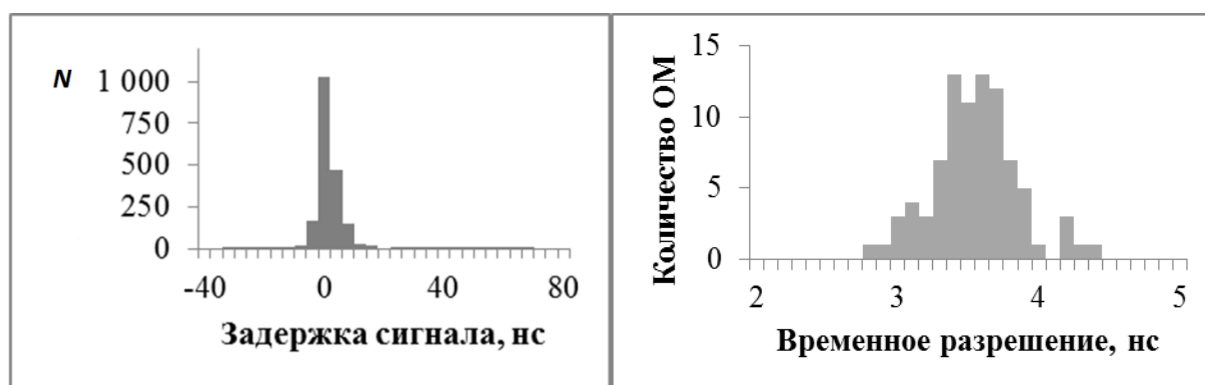


Рис. 3.2.8. Типичный временной спектр ОМ (слева) и распределение ОМ по величине временного разрешения (справа).

Оптический модуль предназначен для регистрации сигналов в широком динамическом диапазоне: от единиц фотоэлектронов (сигналы, инициированные мюонами) до $\sim 10^4$ фотоэлектронов (сигналы от каскадных ливней). Обеспечение линейности спектрометрического канала в диапазоне 10^4 при условии надежной регистрации о.ф.э. импульсов значительно усложняет электронику оптического модуля. Для исключения влияния эффекта насыщения ФЭУ на результаты амплитудных измерений в условиях регистрации больших световых импульсов, необходимо “снимать” сигналы с нескольких динодов фотоэлектронного умножителя (т.е. увеличивать

количество каналов). Что бы избежать увеличения количества каналов был использован другой подход: диапазон линейности выбирался на уровне до 10^2 ф.э., а в нелинейном диапазоне производилось прямое измерение зарядовых градуировочных характеристик каналов. Для измерения градуировочных характеристик использовались светодиодные источники света с регулируемой интенсивностью вспышек, встроенные в оптические модули. В качестве параметра градуировочной кривой использовалась переменная $S = Q / (N_{\text{фэ}} \times Q_{\text{фэ}})$, где Q – измеренный заряд импульса, $Q_{\text{фэ}}$ – заряд о.ф.э. импульса, $N_{\text{фэ}}$ – количество фотоэлектронов, формирующих импульс. Формирование сигналов с заданным количеством фотоэлектронов осуществлялось сложением световых импульсов от двух светодиодов при различных комбинациях яркости их вспышек. Для этого использовался итерационный метод, заключающийся в подборе интенсивности вспышек каждого из двух светодиодов под величину измеренного отклика канала, полученного в условиях совместного включения светодиодов. Последовательное удвоение интенсивности световых вспышек позволяло экстраполировать результаты измерения коэффициента преобразования канала из линейной области (до 100 ф.э.) в нелинейную область работы.

Зависимость параметра S от количества фотоэлектронов (градуировочные кривые) представлены на рисунке 3.2.9 для партии из 87 ОМ. Область линейности составляет величину $\sim 10^2$ ф.э. Сплошная линия на рисунке представляет собой результат аппроксимации градуировочных кривых всех исследованных ОМ функцией $y = 1 / (1 + D)$, где $D = (\lg N_{\text{фэ}} / x_0)^p$, $x_0 = 2,68$, $p = 8,67$. Использование результатов аппроксимации градуировочных кривых индивидуальных каналов (x_0 и p подбираются для каждого канала) позволяет оценивать количество ф.э. в импульсе по измеренному заряду с точность не хуже 20% в диапазоне сигналов до 10^4 ф.э.

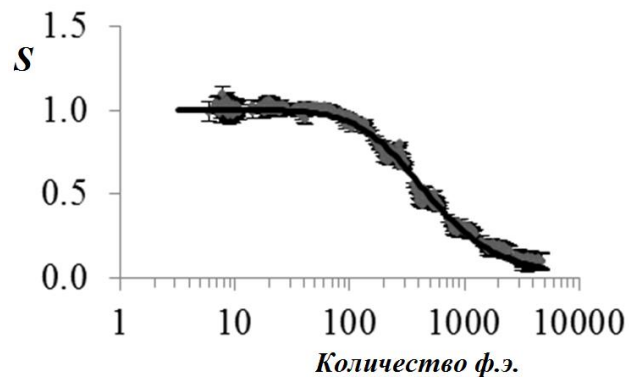


Рис. 3.2.9. Усредненная градуировочная кривая каналов, измеренная для партии из 87 оптических модулей.

Эффект насыщения ФЭУ не только ограничивает диапазон линейности каналов, но и оказывает влияние на точность измерения времени регистрации импульсов большой амплитуды. Время регистрации импульса фиксируется в тот момент, когда величина сигнала достигает половины его максимального значения. В нелинейной области работы канала форма сигнала зависит от его амплитуды, что приводит к тому, что и время регистрации зависит от амплитуды сигнала. Время-амплитудная зависимость характеризуется параметром Δt – отклонением измеренного времени регистрации сигнала от ожидаемого значения, полученного на основании информации о времени формирования импульса светодиода. Характерная зависимость параметра Δt от количества фотоэлектронов, формирующих импульс, представлена на рисунке 3.2.10. В диапазоне линейности канала Δt не превышает 1 нс. Распределение ОМ по граничному значению количества ф.э., для которого $\Delta t < 1$ нс, представлено в правой части рисунка 3.2.10.

Следующим параметром, оказывающим существенное влияние на работу установки, является вероятность возникновения послеимпульсов – сигналов, следующих за основным сигналом ФЭУ, инициированным импульсом света. Послеимпульсы являются основным источником высокоамплитудной (многоэлектронной) компоненты шумов ФЭУ и

определяют величину фактора подавления шумовых сигналов канала порогом регистрации.

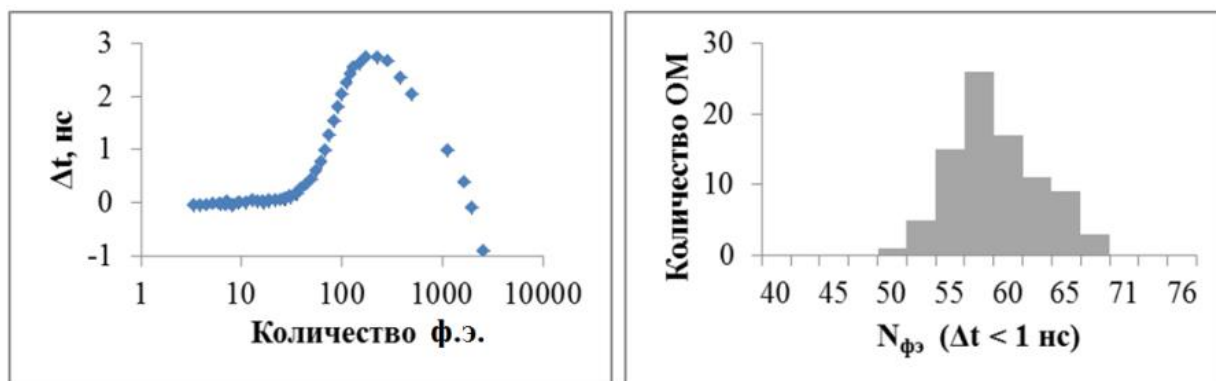


Рис. 3.2.10. Зависимость параметра Δt от количества ф.э. в импульсе и распределение ОМ по граничному значению $N_{\text{фэ}}$, для которого $\Delta t < 1$ нс.

Послеимпульсы формируются ионами, которые образуются в результате взаимодействия электронов с остаточным газом в диодной системе ФЭУ и дрейфуют в сторону фотокатода. Оценка доли послеимпульсов ФЭУ была проведена с использованием светодиодных вспышек малой длительности (~5 нс). Суммарный заряд послеимпульсов $N_{\text{фэ}}^{\text{послеимп}}$ измерялся в области от 300 нс до 50 мкс от основного импульса с шагом в 500 нс для вспышек различной яркости. Заряд послеимпульсов растет практически линейно с яркостью вспышки. В качестве характеристики доли послеимпульсов использовался параметр $R = N_{\text{фэ}}^{\text{послеимп}} / N_{\text{фэ}}^{\text{первичного имп}} \times 100\%$. Характерная зависимость параметра R от времени, прошедшего после регистрации основного импульса, представлена на рисунке 3.2.11. Распределение ОМ по суммарному заряду послеимпульсов в интервале от 0.3 мкс до 50 мкс представлено на рисунке 3.2.12. Доля послеимпульсов для большей части ОМ составляет 10 – 15%.

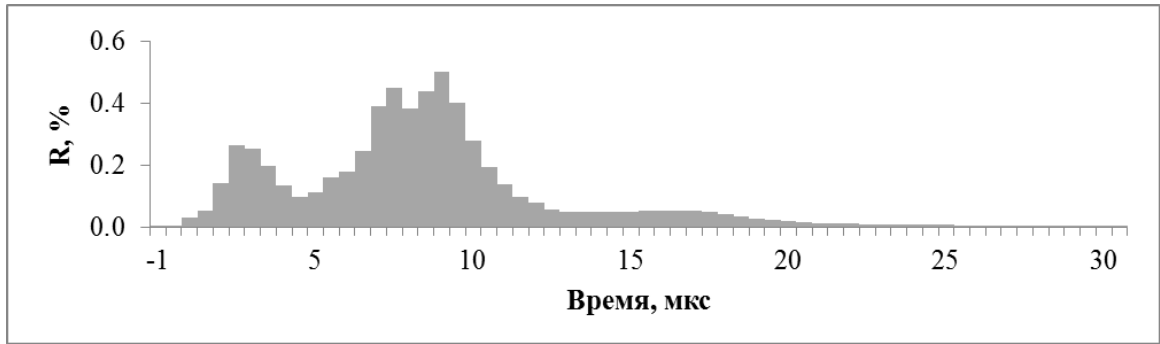


Рис. 3.2.11. Характерная временная зависимость заряда послеимпульсов в 500 нс интервалах для о.ф.э. первичного импульса.

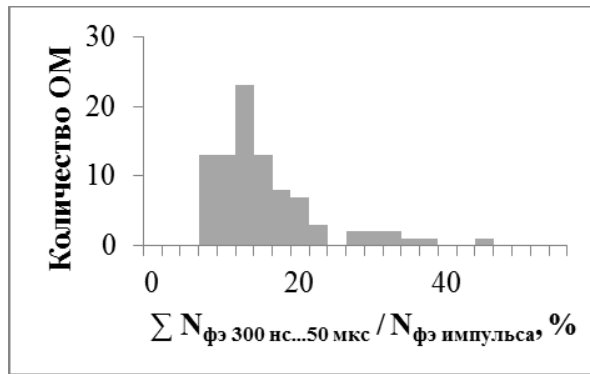


Рис. 3.2.12. Распределение ОМ по суммарному заряду послеимпульсов.

Угловые характеристики ОМ.

Измерение зависимости отклика оптического модуля от угла падения излучения имеет принципиальное значение для математического моделирования работы телескопа и последующего сопоставления экспериментальной информации с расчетными данными. Для измерения угловых характеристик оптических модулей был создан специальный стенд, в состав которого входили поворотный механизм для вращения ОМ, источник света и управляющая электроника. Кронштейн с оптическим модулем крепился на поворотной консоли с регулируемой высотой подъема, что позволяло опускать оптический модуль в стеклянный бак с водой для исключения искажений угловой характеристики, связанных с отражением и преломлением света. На консоли был укреплен шаговый двигатель FL86STH65-2808A (шаг 1.8° , угловая погрешность 0.09°), вращение от которого передавалось через муфту к кронштейну с оптическим модулем.

Управление скоростью и направлением вращения осуществлялось через COM-порт. Общий вид поворотного механизма представлен на рисунке 3.2.13.

Фотокатод ФЭУ засвечивался потоком света от синего светодиода Kingbright L7113 с диффузным рассеивателем, размещенным на расстоянии 3 метра от исследуемого модуля. Светодиод работал в импульсном режиме, длительность импульсов составляла ~ 5 нс.

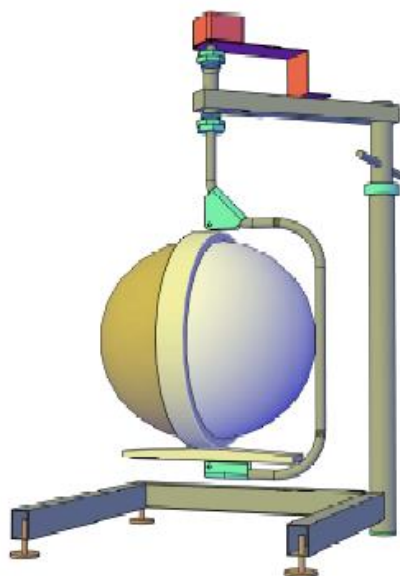


Рис. 3.2.13. *Общий вид поворотного механизма с закрепленным на нем оптическим модулем.*

Стенд для измерения угловых характеристик был расположен в светонепроницаемом помещении. Оптический модуль размещался в водном баке, что обеспечивало воспроизведение условий измерений, аналогичных условиям реальной работы в оз. Байкал. Бак с водой был окружен заземленной металлической сеткой для подавления наводок от внешних электромагнитных полей. Задняя стенка бака была закрыта черной материей для минимизации потока отраженного света. Измерения проводились на цифровом осциллографе LeCroy HDO 4034. Результаты измерения зависимости оклика ОМ от угла падения света относительно оси ФЭУ представлены на рисунке 3.2.14.

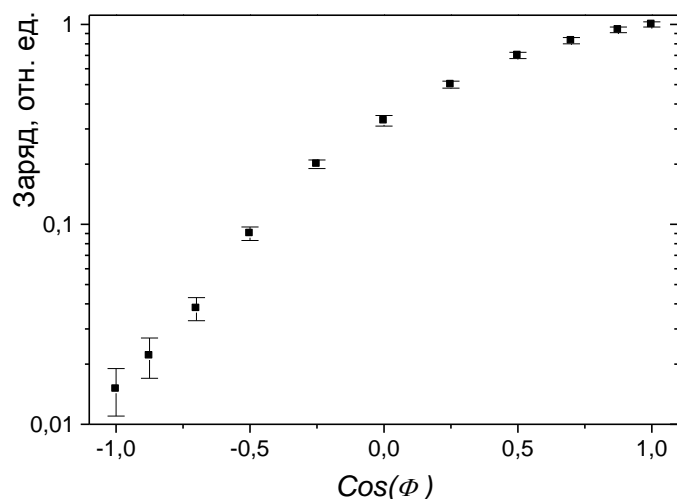


Рис. 3.2.14. Угловая зависимость отклика ОМ.

3.3. Подготовка оптических модулей

При разработке процедуры подготовки оптических модулей решались две основные задачи: обеспечение достаточно высокого темпа сборки ОМ и необходимого уровня надежности их эксплуатации. План развертывания первой очереди нейтринного телескопа Baikal-GVD предусматривает монтаж двух кластеров установки в год. Это требует изготовления и тестирования около 600 оптических модулей ежегодно. Требования к надежности оптических модулей определяются необходимым временем эксплуатации ОМ и возможностями их ремонта. Оптические модули предназначены для непрерывной работы в составе нейтринного телескопа Baikal-GVD в течение не менее 10 лет. Выход из строя отдельных измерительных каналов за этот период не должен существенно снижать эффективность работы установки. Как отмечалось выше, отличительной особенностью Baikal-GVD является возможность ремонта вышедших из строя каналов. Однако, в связи с небольшой продолжительностью периода, в который установка доступна для профилактических работ, возможен ремонт только ограниченного числа ОМ. Первая очередь телескопа Baikal-GVD включает в свой состав $\sim 2,5 \times 10^3$ ОМ, сгруппированных в ~ 100 гирлянд. Учитывая, что для ремонта одного ОМ необходим демонтаж в среднем 50% оптических модулей на гирлянде, в

течение года может быть восстановлено не более 12 – 14 оптических модулей, т.е. ~0.5% от их общего числа. Таким образом, при требовании, чтобы за 10 лет эксплуатации количество работоспособных каналов установки снизилась не более чем на 5%, вероятность выхода из строя ОМ в течение года не должна превышать величину 1%.

Надежность работы ОМ в значительной степени определяется методикой испытаний как его отдельных блоков, так и оптического модуля в целом. Схема, описывающая основные этапы подготовки оптических модулей и методику испытаний аппаратуры на этих этапах, представлена на рисунке 3.3.1.

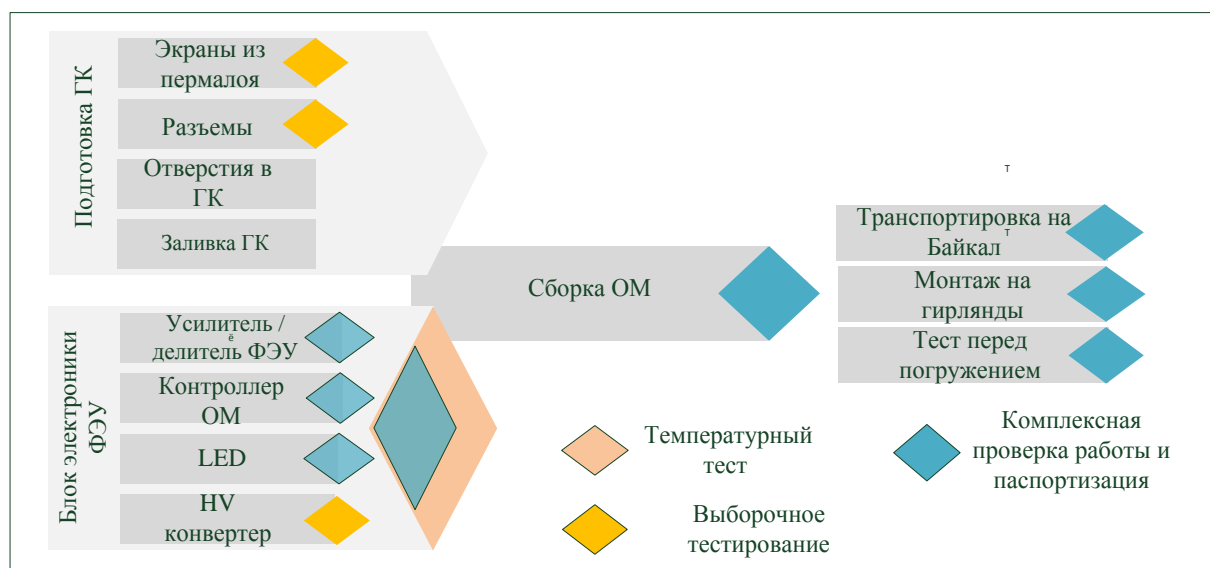


Рис. 3.3.1. Схема поэтапной подготовки и испытаний ОМ.

На первом этапе подготовки ОМ собираются глубоководный корпус (ГК) модуля и блок электроники ФЭУ. Сборка ГК включает в себя установку разъемов и монтаж ФЭУ и защитного экрана из пермалоя. Для этого нижняя полусфера устанавливается в специальный монтажный стапель (см. рисунок 3.3.2). После фиксации ФЭУ на стапеле пространство между ФЭУ и стеклосферой заполняется гелем до уровня, превышающего границу фотокатода на 5 - 6 мм. После заливки геля собранная система вместе со стапелем помещается в вакуумную камеру и выдерживается под вакуумом

(остаточное давление 0,2 – 0,1 атм.) в течение 1,5 часов для удаления пузырей воздуха, попавших в гель в процессе заливки. Затем вакуум в камере понижается до остаточного давления 0,4 атм. Собранный система остается в вакуумной камере еще на 6 часов до полной полимеризации геля. После окончания процесса полимеризации геля в полусфере клеиваются металлические кронштейны, служащие для фиксации блоков электроники и устанавливается ответная часть магнитного экрана. Вторая полусфера оснащается вакуумным портом, манометром, глубоководным разъемом и коммутационной платой.



Рис. 3.3.2. Монтажный станец для монтажа ФЭУ и магнитного экрана.

Блок электроники монтируется непосредственно на цоколь ФЭУ. При подготовке блока электроники ФЭУ осуществляется комплексная проверка и паспортизация всех его электронных узлов (электронных плат усилителя, контроллера и делителя напряжения ФЭУ). Исключения составляют источники высоковольтного напряжения, которые поставляются фирмой TRACO POWER (предусмотрено выборочное тестирование 5% источников из каждой партии). На этом этапе тестирование и паспортизация осуществляется главным образом производителями оборудования в соответствии с разработанным техническим заданием.

Сборка и тестирование блока электроники осуществляется в ИЯИ РАН. Процесс сборки включает в себя монтаж высоковольтного преобразователя напряжения и контроллера ОМ на плату делителя/усилителя ФЭУ, монтаж

драйверов светодиодов и соединение всех элементов кабельными коммуникациями. После сборки, блок электроники проходит стендовые испытания. Процедура тестирования включает в себя полную проверку работоспособности его основных элементов и измерение их амплитудных и временных параметров: задержек сигналов, порогов, коэффициентов усиления каналов и пр. Результаты испытаний заносятся в базу данных параметров оптических модулей.

На завершающем этапе комплексной проверки блока электроники ОМ проводятся его температурные испытания. Цель температурных испытаний – максимально сократить количество так называемых “ранних отказов” электроники во время ее работы в составе установки. На рисунке 3.3.3 показана типовая зависимость частоты отказов электронного оборудования от времени. Выделяются три области: период ранних отказов, период стабильной работы и период износа. Долговременное температурное тестирование электроники предназначено для выявления дефектов электронных компонентов, которые с наибольшей вероятностью проявляются в первые недели работы.

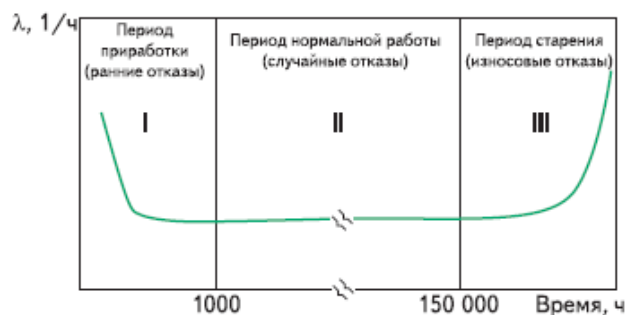


Рис. 3.3.3. Характерный вид зависимости частоты отказов от времени.

При повышении температуры от T_1 до T_2 старение оборудования ускоряется в K_y^T раз:

$$K_y^T = e^{\frac{E_a}{K_B} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}, \quad (3.3)$$

где E_a – энергия активации дефекта, K_B – постоянная Больцмана. При повышении температуры на 10°C старение ускоряется примерно в 2 раза [96]. Учитывая, что температура внутри ОМ в режиме эксплуатации в оз. Байкал составляет величину около 10° , нагревание до 60° обеспечивает фактор ускорения старения ~ 30 .

Для проведения температурных испытаний использовался металлический шкаф с нагревательным элементом в нижней части корпуса, приточным вентилятором и вытяжным отверстием. Температурные испытания проводились при температуре $\sim 60^{\circ}\text{C}$ в течение не менее 24 часов. Это соответствует примерно месяцу работы ОМ в реальных условиях. Этот срок можно считать достаточным для выявления “ранних” отказов электроники и выходом ее на режим работы, в котором вероятность выхода из строя не зависит от времени.

В температурном стенде устанавливалось 24 блока электроники (2 секции ОМ). Все тестируемые блоки подключались к общему источнику питания и управляющему компьютеру. Во время температурных испытаний производился мониторинг всех основных параметров блока электроники (величины высоковольтного напряжения, температура контроллера, напряжений электропитания на контроллере и т. д.). Пример временных зависимостей параметров ОМ, полученных при проведении температурных испытаний, представлен на рисунке 3.3.4. Следует отметить высокую временную стабильность высоковольтного напряжения во время температурных испытаний и отсутствие зависимости величины напряжения от температуры.

После испытаний всех основных элементов ОМ производится сборка оптического модуля: блок электроники монтируется на цоколь фотоэлектронного умножителя, установленного в глубоководном корпусе, и подключается к глубоководному разъему через специализированную плату – адаптер. Комплексный тест ОМ проводится на стендовом оборудовании,

представленном в параграфе 3.2. Процедура измерений занимает в среднем 2,5 часа на один ОМ. В результате формируется таблица параметров оптического модуля (паспорт ОМ).

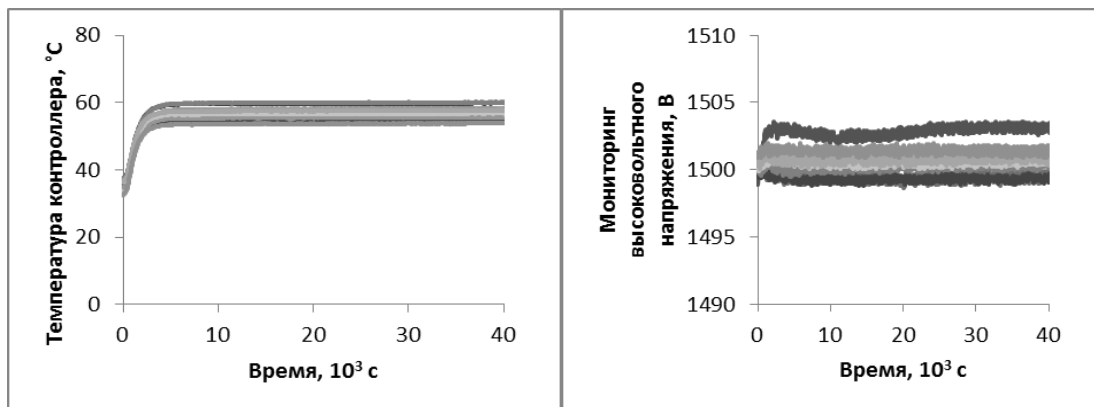


Рис. 3.3.4. Выборочные результаты температурных испытания 10 блоков электроники ОМ: температура контроллера (слева) и величина высоковольтного напряжения (справа).

После комплексной проверки ОМ производится герметизация глубоководного корпуса и откачка воздуха до давления $\sim 0,7$ атм. Давление внутри корпуса ОМ контролируется при помощи манометра. Стабильные показания манометров в течение суток указывают на надежную герметизацию модуля. После откачки воздуха на оптический модуль устанавливается специальная рама для его крепления на кабель-трос. В таком состоянии модули хранятся и перевозятся в специальных транспортировочных ящиках.

Первый вариант технологической линии для сборки и тестирования оптических модулей был подготовлен в ИЯИ РАН. На ней были подготовлены ОМ для первого кластера Baikal-GVD. В 2016 году аналогичная технологическая линия была создана в ОИЯИ (Дубна). В Общей сложности около 600 оптических модулей подготовлено и установлено в составе первых двух кластеров Baikal-GVD. Простота конструкции ОМ, достаточно тщательная проработка процедуры их сборки и полная

автоматизация тестирования и паспортизации позволили добиться темпа подготовки до 6...8 оптических модулей в день, при условии участия в этих работах двух монтажников и одного технического специалиста.

После транспортировки оптических модулей на оз. Байкал они проходят трехэтапную процедуру тестирования. На первом этапе проводится лабораторная проверка функциональности оптического модуля. Затем оптический модуль тестируется после его монтажа в состав гирлянды (непосредственно перед погружением). Последний этап – проверка всех ОМ секции под водой после ее полного монтажа. Представленная процедура подготовки оптических модулей была внедрена в полном объеме с 2014 года и достаточно хорошо зарекомендовала себя с точки зрения отбраковки неисправных узлов и модулей в целом.

Заключение к Главе 3

На базе ФЭУ R7081-100 с повышенной квантовой чувствительностью фотокатода (~35 %) создан ключевой элемент системы регистрации нейтринного телескопа Baikal-GVD: глубоководный оптический модуль (ОМ). Характеристики ОМ удовлетворяют общим требованиям, предъявляемым к фотодетекторам крупномасштабных нейтринных телескопов:

- чувствительность к световому потоку на уровне единичных фотонов;
- динамический диапазон до $\sim 10^4$ ф.э;
- временное разрешение на уровне единиц наносекунд, что соответствует угловому разрешению телескопа менее одного градуса.

Блок электроники оптического модуля обеспечивает выполнение следующих основных функций:

- формирование аналогового выходного сигнала, по переднему фронту которого измеряется время регистрации, а заряд используется для оценки энерговыделения;

- временную и амплитудную калибровку измерительного канала;
- мониторинг параметров оптического модуля;
- управление режимами работы системы регистрации и контроля параметров ОМ.

Разработана методика и создано программное и аппаратное обеспечение для проверки, калибровки и паспортизации оптических модулей. Разработана технологическая линия для сборки и испытаний ОМ, позволяющая подготавливать до 8 оптических модулей в день. Проведены лабораторные испытания и паспортизация оптических модулей, установленных в настоящее время в нейтринном телескопе Baikal-GVD. Программа испытаний включала в себя исследования о.ф.э. спектров, временного разрешения, поведения временных и амплитудных характеристик каналов при регистрации световых импульсов большой интенсивности, вероятности возникновения послеимпульсов ФЭУ.

На основании проведенных исследований оптических модулей можно сделать вывод о достаточно полном соответствии их параметров основным требованиям, предъявляемым к фотодетекторам Байкальского нейтринного телескопа. В области сигналов до $\sim 10^2$ ф.э. (эта область определяет точность реконструкции параметров треков регистрируемых частиц) амплитуда выходного сигнала ОМ линейно зависит от количества регистрируемых фотонов. Кроме того, в этом диапазоне отсутствует зависимость смещения времени регистрации сигналов от их амплитуды. Для больших сигналов разработана методика, позволяющая учитывать нелинейность измерительного канала и восстанавливать интенсивность входного потока излучения с точностью не хуже 10% в области до 10^3 ф.э.

Оптические модули разработаны исходя из требований к надежности работы системы регистрации Байкальского нейтринного телескопа в целом и ее эргономичности: максимальной простоты сборки, монтажа на несущие конструкции установки и подключения к системе сбора данных.

Глава 4. Система сбора данных

Принципы организации системы сбора данных Baikal-GVD (ССД) определяются общей архитектурой нейтринного телескопа, основными структурными элементами которого являются секции оптических модулей, из которых формируются гирлянды и кластеры гирлянд. Кроме того, важным фактором, влияющим на формирование ССД, является способ развертывания телескопа: сборка и монтаж гирлянд осуществляется непосредственно на льду оз. Байкал. Это не позволяет в полной мере использовать высокоскоростную оптоволоконную систему передачи данных, что приводит к необходимости первичного отбора событий на аппаратном (триггерном) уровне для подавления шумовых срабатываний каналов и снижения объема передаваемой информации.

Основными функциями системы сбора данных являются: преобразование аналоговых сигналов ОМ в цифровой код, формирование триггера установки и передача информации в Береговой центр сбора данных. Кроме того, система сбора данных обеспечивает управление режимами работы аппаратуры и системой электропитания детектора, а также осуществляет контроль корректности работы всех элементов установки.

4.1. Аппаратура системы сбора данных

Аппаратуру, используемую для построения системы сбора данных Baikal-GVD, можно разделить на два класса: специализированная электроника, разработанная для Байкальского нейтринного телескопа, и коммерческая аппаратура, которая широко применяется в современных промышленных системах сбора данных. При этом доля специализированного оборудования по отношению к коммерческой электронике минимизирована. Это не только снижает общую стоимость аппаратуры, но и повышает надежность системы в целом (характерное время наработки на отказ современной промышленной аппаратуры, как правило, превышает 10^6 часов).

В состав специализированной аппаратуры входят преобразователи сигналов в цифровой код, контроллеры АЦП, платы управления оптическими модулями и платы триггерной логики. Аппаратура разрабатывалась в период с 2009 по 2015 год компанией ООО "Высокие технологии СК". Первая версия специализированного оборудования для GVD была подготовлена в 2011 году и испытана на экспериментальных гирляндах Байкальского нейтринного телескопа в 2012 году [86]. На рисунке 4.1.1. представлены фотографии 4-х канальной платы АЦП и контроллера АЦП (платы *Мастер*). АЦП обеспечивают преобразование аналоговых сигналов ОМ в цифровой код с частотой 200 МГц. Для обслуживания одной секции из 12 оптических модулей использовались 3 платы АЦП, данные с которых передавались в плату *Мастер* через специализированную кросс-плату. В настоящее время эта версия электронных модулей работает на одной из гирлянд 1-го кластера Байкал-GVD.



Рис. 4.1.1 Фотографии плат специализированной электроники, версия 2012 г.

В 2014 на российском рынке электроники стали доступны сдвоенные микросхемы АЦП (два канала в одном корпусе) с высокой частотой дискретизации фирмы Analog Devices. Это позволило существенно уменьшить количество монтажных элементов на плате АЦП и, в конечном итоге, интегрировать все 12 каналов и контроллер АЦП на одну плату *блока сбора данных секции* (БСД-12). В первой модификации платы для управления

ее работой использовалась одна микросхема ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема) FPGA XILINX Spartan 6. В дальнейшем, в целях снижения температуры микросхемы, плата была доработана, и контроллер АЦП был реализован на двух микросхемах ПЛИС. Фотография и структурная платы БСД-12 представлена на рисунке 4.1.2.

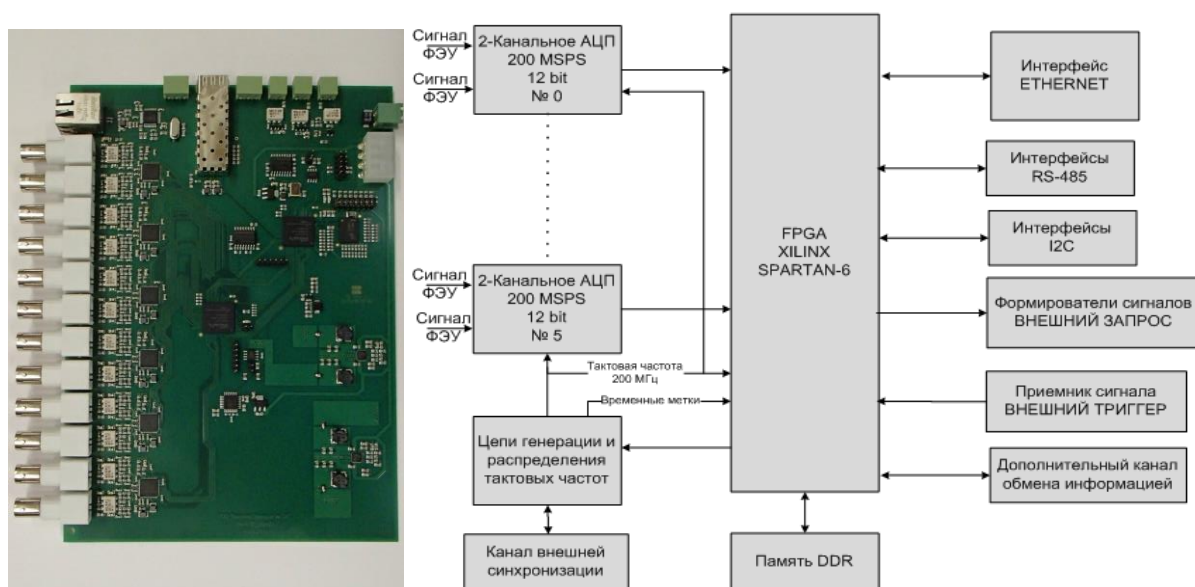


Рис. 4.1.2. Фотография и структурная схема 12-канального блока сбора данных и амплитудного анализа БСД-12.

Плата БСД-12 имеет следующие характеристики:

- На плате реализовано 12 каналов аналого-цифровых преобразователей с частотой дискретизации 200 МГц и временным окном для измерения до 30 мкс.
- На всех 12-ти каналах платы АЦП формируются сигналы *запрос канала*, которые вырабатывается при превышении входным сигналом заданного порога. Пороговые функции реализованы на цифровых дискриминаторах.
- Плата формирует сигнал *внешний запрос* на основании анализа всех сигналов *запрос* от 12 каналов в заданном временном окне.

Временное окно совпадений каналов для формирования сигнала *внешний запрос* может устанавливаться в диапазоне $20 \div 2000$ нс.

- Для синхронизации работы модулей БСД-12 предусмотрен сигнал *внешний триггер*, который инициирует формирование кадров событий (*мастерных записей*): массив “временных кадров” двенадцати каналов АЦП. Предусмотрен также режим внутреннего запуска (триггер формируется по сигналу *внешний запрос* платы).
- Интерфейсный модуль платы поддерживает протокол передачи данных TCP/IP.
- Контроллер платы выполнен на основе FPGA XILINX Spartan 6 и обеспечивает возможность анализа и фильтрации данных, поступающих с каналов АЦП в режиме реального времени.
- Предусмотрена возможность удаленной загрузки рабочей *прошивки* контроллера (управляющей программы).
- Программное обеспечение контроллера позволяет управлять внешними периферийными устройствами по 2-м каналам RS-485 и одному каналу I2C.
- Амплитуды импульсов каждого канала вычисляются в режиме реального времени и аккумулируются в памяти контроллера в виде амплитудных гистограмм с разрешением 10 бит.
- Временное разрешение локальных часов контроллера 5 нс.
- Напряжение электропитания +5 В ($\pm 10\%$), потребление не более 15 Вт.

Переключение режимов работы и установка параметров ОМ осуществляется через специализированную 12-канальную *плату управления оптическими модулями*. Фотография и структурная схема *платы управления ОМ* представлена на рисунке 4.1.3. Плата включает в свой состав 6 коммутируемых каналов RS-485 для обмена данными с 12 оптическими модулями (к каждому каналу подключаются два ОМ). Основными командами управления являются установка высоковольтного напряжения на

делителе ФЭУ, выбор режимов работы и параметров калибровочной и мониторинной систем ОМ, чтение значений параметров блока электроники. На плате установлены двенадцать управляемых ключей для подачи на оптические модули постоянного напряжения +12 В.

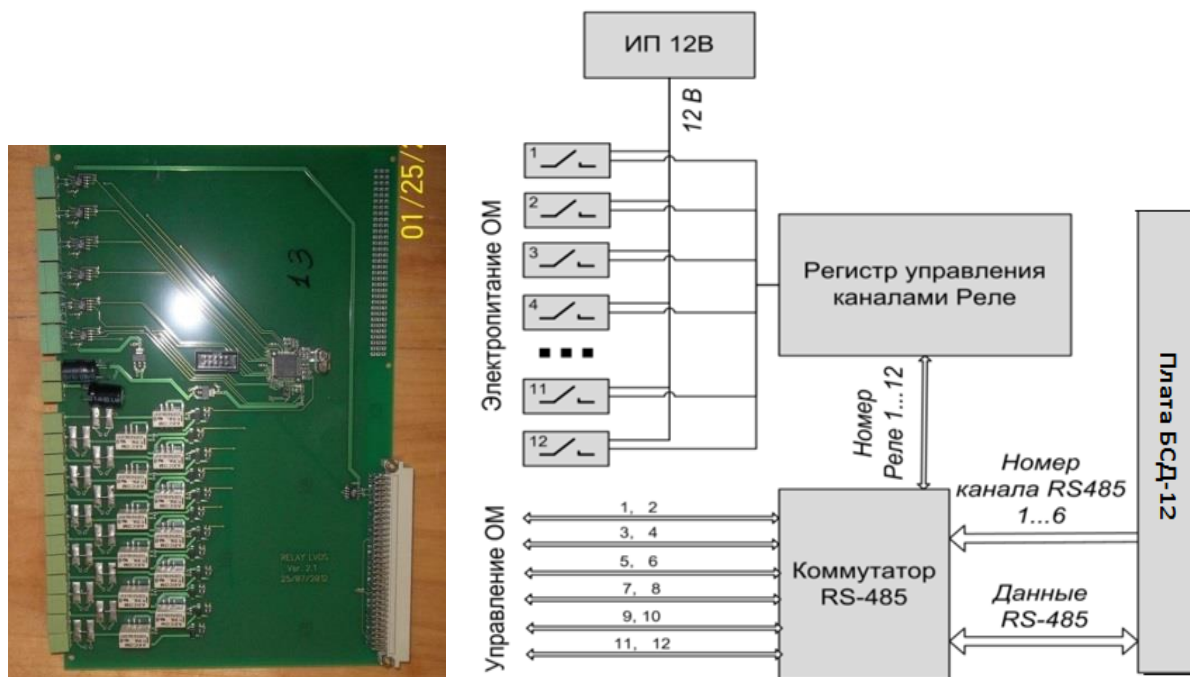


Рис.4.1.3. Фотография и функциональная схема платы управления ОМ.

Данные, необходимые для работы платы управления, поступают по каналу *Ethernet* из центра сбора данных на плату БСД-12, которая транслирует их в коммутатор RS-485. Коммутатор в свою очередь пересылает пакеты данных в контроллеры оптических модулей в соответствии с адресами, указанными в заголовках пакетов. Скорость передачи информации 9600 или 115200 бит/с. Входное напряжение платы управления ОМ +12 В ± 10%, потребляемая мощность не более 5 Ватт.

Платы триггерной логики предназначены для формирования и передачи по длинной линии (до 1 км) сигналов *запрос* и *подтверждение* в сети синхронизации телескопа. Триггерные сигналы формируются платами БСД-12 и представляют собой логические импульсы с амплитудой 3 В и длительностью 500 нс. Внешний вид плат показан на рисунке 4.1.4. Платы снабжены системой управления на основе ПЛИС Xilinx Spartan 6,

позволяющей маскировать каналы и менять пороги регистрации и параметры выходных сигналов. Управление работой плат триггерной логики осуществляется по интерфейсу RS-485.



Рис. 4.1.4. Внешний вид плат триггерной логики: плата триггера гирлянды (сверху) и кластера (снизу).

Плата триггера гирлянды позволяет суммировать запросы, поступающие от блоков БСД-12, расположенных на одной гирлянде, и разветвлять сигналы *подтверждение*, поступающие из центра управления кластера. К плате может быть подключено до четырех блоков БСД-12. Выход объединенного сигнала *запрос* и входы сигналов *подтверждение* защищены от грозовых разрядов. Напряжение электропитания платы $+24\text{ В} \pm 10\%$.

Плата триггера кластера предназначена для разветвления сигналов *подтверждение*, формируемых в центре управления кластера, на гирлянды кластера. В плате предусмотрено 12 выходов сигнала *подтверждение*, защищенных от грозовых разрядов. Она может работать и как пассивный разветвитель (рабочий режим), и как генератор сигналов заданной частоты (тестовый режим). В тестовом режиме предусмотрена возможность регулировки относительных временных задержек выходных импульсов. Напряжение электропитания $+5\text{ В} \pm 10\%$.

Все специализированные платы электроники выполнены в стандарте *Евромеханика 6U*, рабочий диапазон температур эксплуатации: $-10^{\circ}\text{C} \div +40^{\circ}\text{C}$, диапазон температур хранения: $-30^{\circ}\text{C} \div +60^{\circ}\text{C}$.

В то время как специализированная аппаратура установки главным образом решает задачи сбора и преобразования сигналов, поступающих с модулей регистрирующей системы детектора, коммерческая электроника обеспечивает передачу данных и обмен информацией между различными системами телескопа. Система передачи данных установки формируется двумя типами каналов обмена информацией. Первый канал обеспечивает передачу информации, поступающую с оптических модулей. Для него требуется максимальная скорость работы (т. н. *быстрый канал связи*). Второй канал используется для управления работой аппаратуры и не требует высокой скорости передачи данных (*медленный канал связи*). *Быстрый канал связи* реализован на основе технологий *Ethernet*, характеризующихся высокой надежностью и степенью проработки, и большим выбором промышленной аппаратуры, позволяющей передавать информацию на значительные расстояния по разнотипным кабельным коммуникациям (обычные провода, витая пара, оптоволокно). Для *медленного канала связи* используется 2-х проводной интерфейс RS-485. Выбор технологии RS-485 обусловлен несколькими факторами: высокой надёжностью, простотой реализации, хорошей помехозащищённостью и стабильностью связи. В качестве физического носителя применяется витая пара с волновым сопротивлением 100-120 Ом. Использование витой пары обеспечивает высокую устойчивость к синфазной помехе. Линии RS-485 могут быть длиной до 1200 метров с пропускной способностью ~ 10 кбит/с.

При выборе фирмы-поставщика коммерческой электроники основными критериями являлись: возможность приобретения полного набора аппаратуры у одного производителя (обеспечение совместимости), высокий уровень надежности, широкий температурный диапазон. Этим критериям

удовлетворяет аппаратура компании MOXA [97], которая специализируется на изготовлении коммуникационного оборудования для промышленной автоматизации. В таблице 4.1.1 представлен перечень базовой аппаратуры, используемой для системы передачи данных Baikal-GVD. В ее состав входят коммутаторы, преобразователи и удлинители *Ethernet*.

Таблица 4.1.1. Коммерческая аппаратура, используемая в ССД установки

Наименование	Функциональное назначение	Время наработки на отказ, час.
Моха IEX-402-SHDSL	Удлинитель Ethernet по технологии SHDSL	1.3×10^6
Моха EDS-408A	Коммутатор 8 x 10/100BaseTX с базовыми функциями управления.	1.3×10^6
Моха EDS-205	Неуправляемый компактный коммутатор 5 x 10/100BaseTX в пластиковом корпусе на DIN рейку	1.1×10^6
Моха NPort 5150A	1-портовый асинхронный сервер RS-232/422/485 в Ethernet	3.9×10^6
Моха NPort IA 5250	2-портовый усовершенствованный асинхронный сервер RS-232/422/485 в Ethernet	2.2×10^5

Функции, которые выполняют коммутаторы и преобразователи *Ethernet*, достаточно очевидны и выбор конкретного типа устройств зависит только от требуемого количества каналов и способа управления режимами их работы. Выбор типа удлинителя *Ethernet* потребовал проведения достаточно длительных лабораторных и натурных исследований.

Необходимость использования удлинителей *Ethernet* связана с тем, что максимальная длина линий передачи по 4-х проводному каналу *Ethernet* составляет ~100 метров, в то время как протяженность отдельных сегментов информационной сети телескопа достигает километра. На сегодняшний день одной из наиболее эффективных систем передачи информации на большие расстояния в сети *Ethernet* являются DSL-модемы. xDSL (Digital Subscriber Line) - семейство технологий, позволяющих значительно расширить пропускную способность линии передачи данных путем использования

эффективных методов коррекции искажений сигналов на линии. В качестве среды передачи сигнала используют экономичные кабели типа “витая пара”. Существующие типы технологий xDSL, различаются в основном по используемой форме модуляции и скорости передачи данных.

Основные параметры линии передачи данных, такие как пропускная способность и стабильность работы, определяются, помимо возможностей самих DSL модемов, также характеристиками кабельных линий и уровнем помех. При разработке *Ethernet*-каналов передачи данных нейтринного телескопа было проведено исследование пропускной способности и помехоустойчивости линий на основе DSL-модемов, использующих конкурирующие технологии кодирования и эхо-подавления: SHDSL и VDSL2. VDSL2 является новейшим и самым передовым стандартом xDSL широкополосных проводных коммуникаций. Протокол VDSL2 позволяет передавать данные с совокупной скоростью нисходящего и восходящего потоков до 200 Мбит/с, однако, по сравнению с SHDSL, предъявляет более жёсткие требования к качеству кабельных линий, их длине и уровню шумов.

Проверка возможностей технологий SHDSL и VDSL2 была проведена на модемах Sigrand SG-17B-3.3-M [98] и qBRIDGE-307i [99]. При лабораторных испытаниях километровой линии на базе VDSL2-модемов была получена скорость передачи данных ~40 Мбит/с, в то время, как предельная скорость для SHDSL модемов составила 15 Мбит/с. Однако испытания этих модемов в условиях реальной работы телескопа показали существенно другое соотношение их характеристик. Лучшие показатели скорости передачи по глубоководным кабелям Байкальского телескопа были получены с SHDSL-модемами – до 10 Мбит/с. Реальная скорость передачи данных VDSL2 модемов не превысила величину ~2 Мбит/с. Это указывает на существенно лучшую помехозащищенность линий передачи на основе SHDSL технологии, которая в настоящее время и используется для передачи данных в установке. До 2014 года единственными DSL-модемами на основе этой технологии,

представленными на российском рынке промышленной телекоммуникационной аппаратуры, являлись устройства Sigrand SG-17B. На этих модемах была реализована система сбора данных первого кластера Baikal-GVD. Не смотря на то, что они зарекомендовали себя как достаточно надежные устройства, начиная с 2015 года был начат поэтапный переход на SHDSL-модемы компании MOXA (IEX-402-SHDSL) [100], которые в это время появились на российском рынке промышленной электроники. Этот переход был обусловлен как более широким температурным диапазоном этих устройств, так и возможностью удаленного управления скоростью их работы, которая не предусмотрена в модемах серии Sigrand.

Представленная в данном разделе специализированная и коммерческая аппаратура была использована для построения система сбора и передачи данных телескопа, основными элементами которой являются *измерительный канал, секция* оптических модулей, *гирлянда* и *кластер гирлянд*.

4.2. Измерительный канал и его характеристики

Измерительный канал установки [101, 102] включает в свой состав фотодетектор, усилитель сигналов, коаксиальный кабель длиной 90 метров по которому передаются импульсы от ОМ, и АЦП, предназначенный для измерения формы импульса. Структурная схема канала представлена на рисунке 4.2.1. Фотодетектор и усилитель сигналов размещаются в оптическом модуле, АЦП - в *центральной модуле секции* (ЦМ). Характеристики оптических модулей представлены в главе 3.

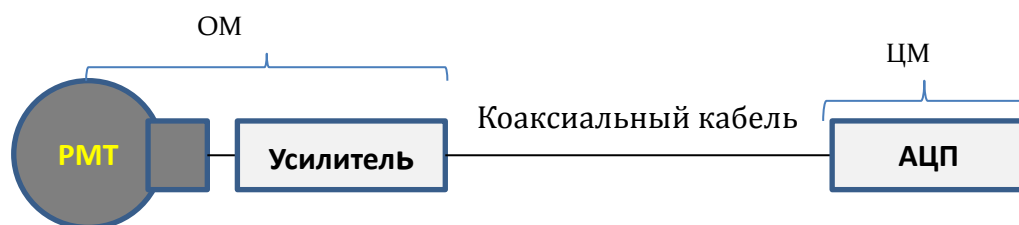


Рис. 4.2.1. Структурная схема измерительного канала установки.

Измерение формы импульсов сигналов, поступающих с оптических модулей, осуществляется в плате БСД-12 (см. параграф 4.1). Функциональная

схема одного канала платы представлена на рисунке 4.2.2 [101]. Аналоговый сигнал с оптического модуля поступает на вход АЦП через импульсный трансформатор, обеспечивающий согласование уровней сигнала и гальваническую развязку. АЦП преобразует сигнал в цифровой код с частотой дискретизации 200 МГц и разрешением 12 бит. Оцифрованный сигнал транслируется в ПЛИС (Xilinx Spartan 6) для буферизации и последующей обработки. В ПЛИС организованы два канала обработки сигнала: *канал данных* и *канал запросов*.

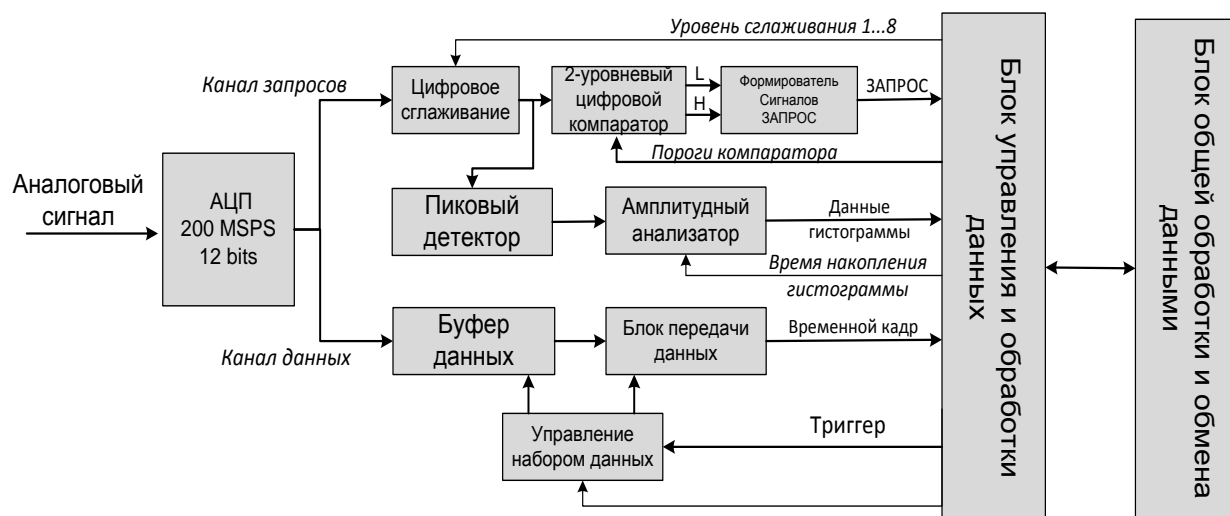


Рис. 4.2.2. Функциональная схема канала платы аналогового преобразования сигналов и сбора данных.

Информация, поступающая по каналу данных, непрерывно записывается в кольцевой буфер размером 6144 отсчёта АЦП, что соответствует длительности временного окна для записи данных 30.7 мкс. Выбор длительности временного окна обусловлен величиной суммарного времени прохождения сигналов *запрос* и *подтверждение* между секциями оптических модулей и центром управления *кластера*. Остановка записи в кольцевой буфер и последующая передача пакета данных осуществляется по триггерному сигналу (сигнал *подтверждение*). Предусмотрена установка программно-управляемой задержки начала записи, предназначенной для регистрации входных сигналов, сформированных после поступления

триггерного сигнала. После остановки кольцевого буфера 1024 отсчёта из него (положение этих отсчётов относительно момента остановки задаётся программно) переписывается во второй буфер (буфер чтения), после чего кольцевой буфер освобождается и автоматически переходит в режим записи. Наличие буфера чтения позволяет минимизировать мёртвое время между двумя последовательными событиями. Его величина определяется временем записи данных в буфер чтения и составляет величину ~ 10 мкс. Данные из буфера чтения формируют временной кадр канала, содержащий полную информацию об импульсах, зарегистрированных во временном окне 5,1 мкс. Дискретность измерения времени в кадре определяется частотой АЦП и составляет величину 5 нс. Диапазон измерения канала $\pm 3,4$ В позволяет без искажений записывать импульсы с оптических модулей с максимально возможной амплитудой (см. главу 3) с разрешением 1,65 мВ. Характерная ширина шумовой дорожки канала составляет величину менее 10 отсчетов АЦП. При средней величине одноэлектронного сигнала 25 отсчетов, минимальный порог регистрации канала составляет $\sim 0,2$ ф.э.

На рисунке 4.2.3 приведен пример графического представления временного кадра канала. Данный временной кадр содержит два одно-фотоэлектронных сигнала и сигнал с амплитудой ~ 30 фотоэлектронов. Биполярный сигнал, задержанный относительно основного сигнала на величину около 0,9 мкс, возникает в результате отражений импульсов от глубоководных разъемов кабеля.

Канал *запросов* является частью триггерной системы установки. В его состав входят модули цифрового сглаживания сигналов, цифровых компараторов и амплитудный анализатор, предназначенный для общего контроля работы измерительного канала. Модуль сглаживания представляет собой цифровой фильтр, обеспечивающий сглаживание сигналов по заданному количеству временных отсчетов АЦП (уровень сглаживания $K = 1, 2, 4$ или 8). На выходе фильтра формируется значение сигнала, усредненное

по K отсчетам. Применение процедуры сглаживания позволяет подавить шумы электроники (основными источниками шумов являются импульсные преобразователи напряжения), которые представляют собой “пачку” биполярных импульсов с амплитудой до 10 мВ и длительностью 2 – 3 отсчета АЦП.

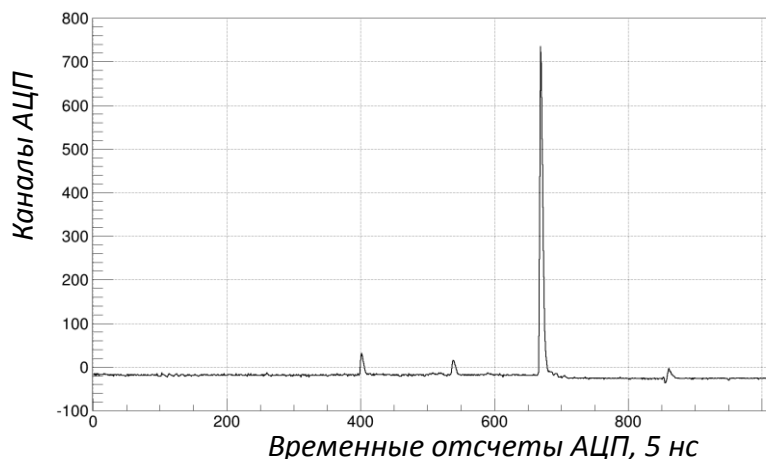


Рис. 4.2.3. Графическое представление временного кадра канала.

Для формирования сигналов *запрос* канала и для работы *амплитудного анализатора* используются сглаженные данные. Сглаженный сигнал поступает в блок формирования сигнала *запрос* и блок *амплитудного анализатора*. Блок формирования сигнала *запрос* состоит из двухуровневого цифрового компаратора, сравнивающего обработанный сигнал с программно предустановленными порогоми (т.н. *низкий* и *высокий* пороги), и формирователя сигнала *запрос*. Предустановленные значения низкого и высокого порогов компаратора (L и H соответственно) могут варьироваться в зависимости от режима работы установки. В режиме экспозиции *низкий порог* выбирается на уровне 0,3 - 1,5 ф.э., *высокий* составляет 3 - 4 ф.э. в зависимости от уровня светового фона оз. Байкал.

В том случае, если значение данных АЦП превысило низкий порог, запускается процесс поиска значения максимума импульса. Максимум импульса ищется до момента, когда значение данных станет меньше низкого порога. Одновременно включается *окно задержки* формирования внутреннего сигнала *запрос*, равное 120 нс. Введение такой задержки

позволяет исключить случаи временной привязки импульса не к основному сигналу, а к инициируемому им *предимпульсу* ФЭУ. Максимальное значение сигнала записывается в соответствующую ячейку *амплитудного анализатора*. После окончания *окна задержки* производится анализ величины максимума амплитуды импульса. Если максимум амплитуды превысил *высокий порог*, формируется внутренний сигнал *запрос* с меткой высокого порога (*запрос H*), если нет – с меткой низкого порога (*запрос L*). Запросы *L* и *H* используются для формирования триггера секции оптических модулей. Амплитудный анализатор используется для контроля работы измерительного канала. Он состоит из пикового детектора, вычисляющего амплитуду импульса, и блока формирования амплитудных гистограмм (1024 канала). Параметрами амплитудного анализатора является порог регистрации (низкий порог *L*) и время накопления гистограммы. На рисунке 4.2.4 представлен пример амплитудных гистограмм, накопленных анализатором за 10 секунд в режиме регистрации шумовых импульсов и регистрации сигналов от калибровочного светодиода оптического модуля. Цена деления канала гистограммы 3,3 мВ, примерно в 8 раз меньше средней амплитуды одноэлектронного сигнала.

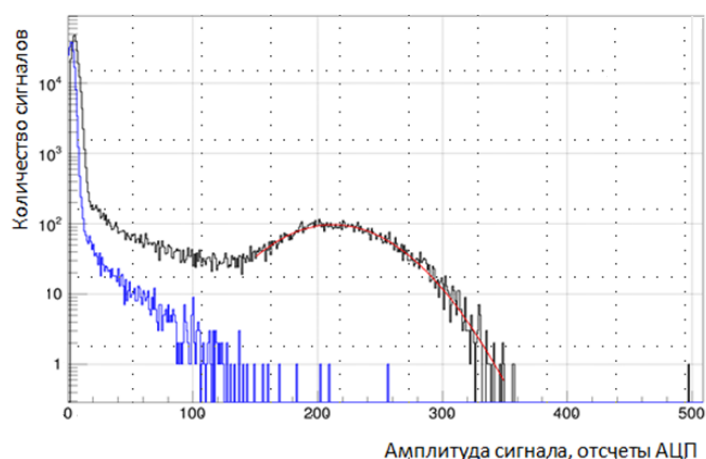


Рисунок 4.2.4. Графическое представление амплитудных гистограмм канала в режиме регистрации шумов (синяя линия) и сигналов от калибровочного светового источника (черная линия).

Помимо оперативного контроля работы канала амплитудные гистограммы позволяют измерять темп поступления сигналов *запрос* канала при реальном установленном пороге регистрации, контролировать величину порогов и осуществлять оперативную настройку режимов работы калибровочного источника света (оптимизировать амплитуду светового сигнала). Основные характеристики измерительного канала представлены в таблице 4.2.1.

Таблица 4.2.1. Основные характеристики измерительного канала

	Характеристика канала	Значение
1	Дискретность измерения	5 нс
2	Амплитудное разрешение	1,65 мВ
3	Длительность временного кадра	0,1 ... 5,1 мкс
4	Диапазон регулировки начала временного кадра относительно триггерного сигнала	± 30 мкс
5	Диапазон измерения амплитуд	$\pm 3,4$ В
6	Мертвое время	10 мкс
7	Амплитуда собственных шумов (пик - пик)	10 мВ

4.3. Структурные элементы системы сбора данных

Основными структурными элементами системы сбора данных установки являются *секции оптических модулей, гирлянды и кластеры гирлянд*. В данном параграфе представлены описание, принципы формирования и основные характеристики этих элементов.

Секция оптических модулей. Оптические модули глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD группируются в *секции*. Секция представляет собой функционально законченный узел, включающий в себя системы регистрации излучения, цифровой обработки сигналов,

амплитудной и временной калибровки, формирования триггера и передачи данных. Базовая конфигурация секции, являющаяся в настоящее время основой для создания первой очереди детектора Baikal-GVD, включает в свой состав 12 оптических модулей и центральный модуль секции (ЦМ) [100, 101]. Схема размещения глубоководных модулей секции представлена на рисунке 4.3.1. ОМ монтируются на грузонесущем тросе, на расстоянии 15 метров друг от друга. В центре секции размещается центральный модуль, выполняющий функции преобразования, обработки и передачи сигналов, зарегистрированных ОМ. Оптические модули подключаются к ЦМ посредством глубоководных кабелей длиной 90 метров. ЦМ, в свою очередь, соединяется с коммутационным модулем гирлянды (МГ) кабелем секции, по которому передаются данные, триггерные сигналы и подводится электропитание: 300 Вольт постоянного напряжения. Расположение ЦМ в центре секции позволяет минимизировать длину глубоководных кабельных коммуникаций. Использование кабелей одинаковой длины для подключения ОМ обеспечивает унификацию параметров сигналов, поступающих со всех оптических модулей.

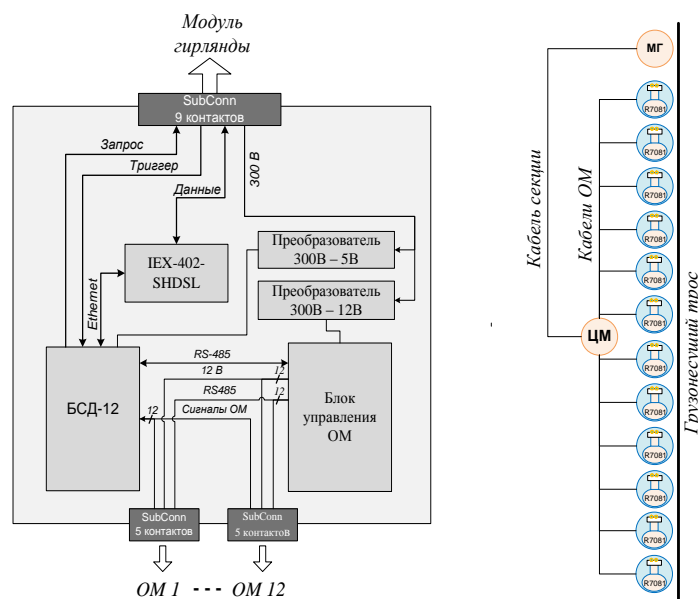


Рис. 4.3.1. Структурная схема центрального модуля секции (слева) и схема размещения глубоководных модулей одной секции (справа).

Центральный модуль секции (см. рисунок 4.3.1) включает в свой состав плату БСД-12, плату управления оптическими модулями, shDSL-модем и преобразователи напряжения. Плата БСД-12 (см. рисунок 4.1.2) обеспечивает преобразование аналоговых сигналов от ОМ в цифровой вид, формирование триггера секции, обработку и передачу данных. Плата управления оптическими модулями (см. рисунок 4.1.3) позволяет включать и выключать электропитание ОМ и устанавливать режимы их работы. shDSL-модем Моха IEX-402-SHDSL (см. таблицу 4.1.1) выполняет функции удлинителя линии Ethernet, по которой осуществляется передача данных из ЦМ в МГ. Для преобразования входного напряжения 300 В в 12 В (для платы управления ОМ) и 5 В (для платы БСД-12) используются высоконадежные импульсные источники питания фирмы Traco Power: TCL 060-112 и TCL 024-105 (время наработки на отказ 3 миллиона часов). Источники питания монтируются на коммутационную плату электропитания, фотография которой представлена на рисунке 4.3.2. Использование такой платы существенно повышает технологичность и надежность сборки ЦМ. Энергопотребление секции складывается из потребления 12 оптических модулей (в среднем 2.6 Вт на модуль) и потребления электроники ЦМ (около 25 Вт) и, с учетом к.п.д. источников питания 0.88, составляет величину $\sim 0,2 \text{ А} \times 300 \text{ В}$.

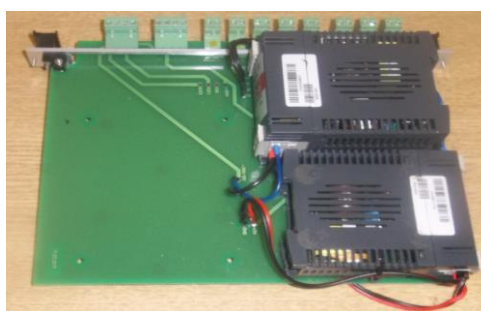


Рис. 4.3.2. Коммутационная плата электропитания ЦМ.

Электронные блоки ЦМ размещаются в крейте (механический стандарт VME). Крейт с электроникой устанавливается в глубоководный стеклянный

корпус, аналогичный корпусу оптического модуля (см. рисунок 4.3.3). Поверхность корпуса затемняется для предотвращения попадания света от индикационных светодиодов на оптические модули через стенку корпуса.

Для связи ЦМ с оптическими модулями используются глубоководные герметичные 5-контактные разъемы SubConn LPBH5FSS. Подключения разъемов к платам электроники ЦМ осуществляется через адаптеры, аналогичные тем, которые применяются в ОМ. Для связи ЦМ с модулем гирлянды применен 9-контактный разъем SubConn LPBH9FSS, имеющий те же технические характеристики, что и 5-контактный разъем [93]. В модуль гирлянды передаются сигналы *запрос* (триггер секции) и данные с оптических модулей. Из МГ поступают электропитание 300 В, сигнал *подтверждение* (глобальный триггер установки) и команды управления. Передача электропитания в ЦМ осуществляется по двум независимым жилам (питание оптических модулей и платы БСД-12 разделены). Это позволяет выключать БСД-12 без отключения оптических модулей. Необходимость отключения питания платы возникает на этапах отладки и настройки локальной подводной сети телескопа.

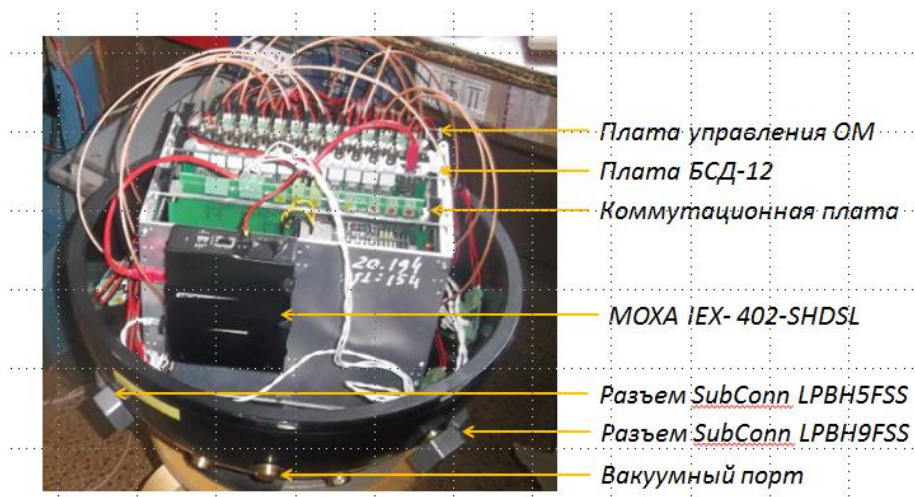


Рис. 4.3.3. Крейт ЦМ с электроникой, установленный в глубоководный корпус.

Задачей триггерной системы является выделение сигналов от мюонов и каскадных ливней при условии подавления шумовых срабатываний каналов до уровня, обеспечивающего возможность устойчивой передачи информации в Береговой центр сбора данных установки. Основными источниками шумовых срабатываний каналов являются фоновое свечение воды оз. Байкал и собственные шумы фотоэлектронных умножителей. Принципиально важной особенностью фонового свечения озера Байкал является отсутствие световых вспышек. Следствием этого является одноэлектронный характер шумовых сигналов и отсутствие временной корреляции между шумовыми срабатываниями ОМ. Это позволяет применить стандартную методику подавления шумовых срабатываний, основанную на регистрации совпадений сигналов от нескольких оптических модулей и выделении сигналов ОМ с амплитудой в несколько фотоэлектронов. Такой же подход применим и для подавления собственных шумов ФЭУ.

Триггерная логика секции реализована на базе ПЛИС, входящей в состав платы БСД-12. Основным элементом триггерной логики является *анализатор запросов*, на вход которого поступают *запросы каналов L и H* (см. параграф 4.2). *Запрос L* формируется при условии превышения входного сигнала уровня низкого порога регистрации, *запрос H* - высокого порога. На рисунке 4.3.4 представлена функциональная схема системы формирования триггера и передачи данных секции. Технически анализатор запросов реализован как *матрица совпадений* запросов *L* и *H* ($12L \times 12H$). В матрицу совпадений записывается информация о конфигурации каналов секции, совпадение запросов с которых должно сопровождаться выработкой *запроса секции*. Значение “1” на пересечении *i*-ой строки и *j*-ого столбца матрицы совпадений указывает на то, что в формировании триггерного условия будет участвовать событие, когда превышен высокий порог канала *i* и любой из порогов канала *j*. После поступления первого *запроса* в матрицу совпадений начинается суммирование всех пришедших *запросов* в соответствии со значениями ячеек

матрицы в течение установленного интервала времени (*временное окно* схемы совпадений). Величина *временного окна* задается динамически в диапазоне от 10 нс до 5 мкс. По завершении *временного окна* полученная сумма сравнивается с установленной величиной кратности совпадений.

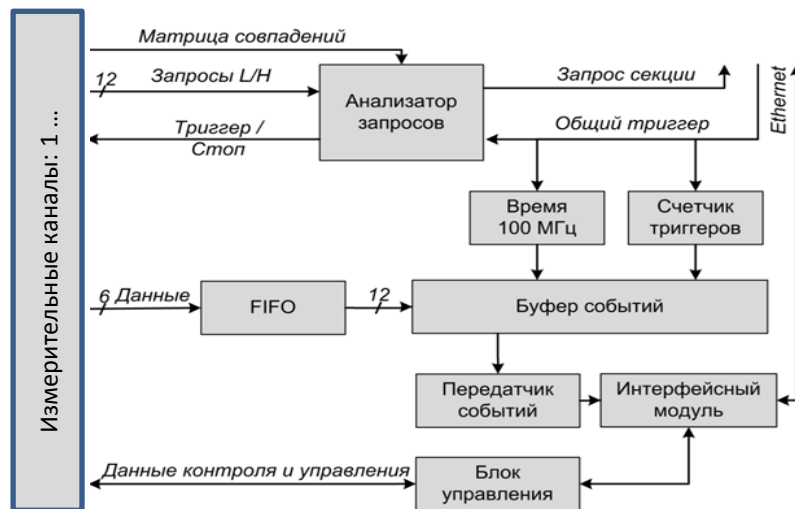


Рис. 4.3.4. Функциональная схема системы формирования триггера и передачи данных платы БСД-12.

Предусмотрены два режима работы триггерной системы: мажоритарные совпадения сигналов запросов L с кратностью n (“триггер $n \times L$ ”), и совпадения L и H запросов с пар соседних оптических модулей (“триггер $L \& H$ ”). На рисунке 4.3.5 представлены варианты заполнения матрицы совпадений для этих двух режимов.

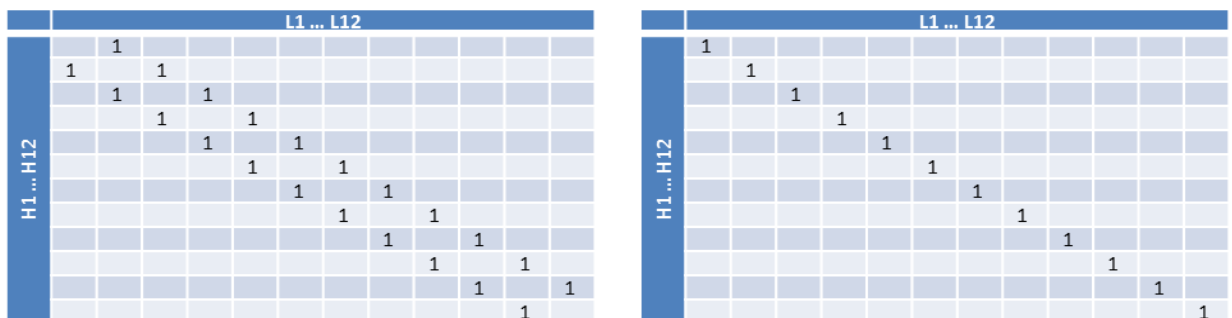


Рис. 4.3.5. Конфигурации матрицы совпадений для двух режимов формирования триггера: совпадение пар соседних каналов с низким и высоким порогами (слева) и совпадения каналов с низким порогом с заданной кратностью совпадений (справа).

Запрос секции поступает на счетчик запросов и передается в центр сбора данных кластера, где формируется общий триггер (сигнал *подтверждение*), который инициирует генерацию общего сигнала *стоп* для всех измерительных каналов и чтение данных АЦП. Данные с каждого канала АЦП (временные кадры) объединяются в виде *мастерных записей*, которые помимо временных кадров всех 12 каналов содержат информацию о времени регистрации сигнала *стоп* и состоянии счетчиков *запросов* и *подтверждений*. Эта информация используется для объединения записей об одном событии с разных секций. Длина не преобразованной *мастерной* записи без учета заголовка составляет 12×2048 байт (информация о временных развертках сигналов с дискретностью 5 нс, полученная с двенадцати каналов секции в интервале 5 мкс).

Мастерные записи секции передаются в центр сбора данных кластера по линии Ethernet через shDSL-модем. Максимальная скорость передачи данных в линии ограничивается быстродействием shDSL-модема и составляет величину ~ 6 Мбит/сек. Относительно низкая скорость передачи данных ограничивает допустимую частоту формирования триггерных событий при передаче не преобразованных *мастерных* записей на уровне ~ 30 Гц. Такое ограничение приводит к необходимости увеличения порогов регистрации каналов и, соответственно, к снижению эффективности регистрации физических событий (в первую очередь мюонов).

Для увеличения пропускной способности линии передачи данных осуществляется преобразование *мастерных записей*: из них выделяются области, в которых данные АЦП превышают пьедестал на величину ~ 0.3 одно-фотоэлектронного сигнала (значение порога выделения сигналов может задаваться динамически). На рисунке 4.3.6 представлены примеры выделения полезных сигналов из временных кадров каналов. Алгоритм выделения сигналов реализован на аппаратном уровне и позволяет осуществлять преобразование *мастерных записей* с частотой до 2 кГц. В том случае, если

ни на одном из каналов секции не было найдено сигналов, формируется *нулевая мастерная запись*, содержащая только время прихода сигнала *стоп* и состояние счетчиков триггерных сигналов. Средний размер преобразованной записи зависит от режима работы установки. В режиме экспозиции он составляет величину около 300 байт. С учетом пропускной способности линии передачи данных секции, надежная передача преобразованных данных возможна при частоте формирования триггерных сигналов до ~ 2 кГц, что позволяет снизить пороги регистрации каналов до одно-фотоэлектронного уровня.

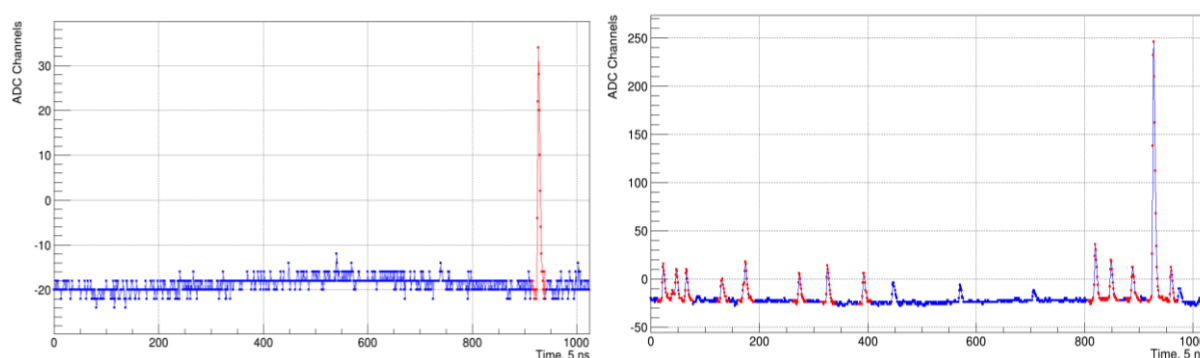


Рис. 4.3.6. Примеры полезных сигналов (показаны красным цветом), выделенных из временных кадров каналов.

Входные параметры программы выделения полезных сигналов (порог, временные интервалы до и после импульса, коэффициент сглаживания данных) автоматически загружаются в плату БСД-12 при ее инициализации. Кроме того, предусмотрена возможность удаленного изменения этих параметров, что позволяет оптимизировать алгоритмы фильтрации в зависимости от класса решаемых задач.

Гирлянда оптических модулей. Глубоководные модули регистрирующей системы детектора Baikal-GVD размещаются на вертикальных грузонесущих кабелях, формируя гирлянды. Базовая конфигурация установки Baikal-GVD предполагает монтаж трех секций оптических модулей на одной гирлянде. При расстоянии между ОМ 15 метров, длина гирлянды составляет 525 метров. Гирлянды фиксируются на дне оз. Байкал при помощи якорей.

Нижний оптический модуль гирлянды размещен на глубине 1275 метров (около 100 м от дна оз. Байкал), верхний находится в 750 метрах от поверхности озера. Помимо трех секций ОМ, в состав системы сбора данных гирлянды входят коммутационный модуль гирлянды (МГ) и аппаратура системы акустического позиционирования – акустические модемы (АМ). Общий вид гирлянды, включающей в свой состав 36 оптических модулей и 4 акустических модема, представлен на рисунке 4.3.7.

Коммутационный модуль гирлянды выполняет функцию интерфейса, связывающего секции оптических модулей с центром сбора данных кластера. Он обеспечивает прием и передачу данных от секций, синхронизацию их работы и управление электропитанием. В состав МГ входит три блока электроники: сетевой коммутатор, коммутатор электропитания и плата триггера гирлянды. Сетевой коммутатор гирлянды представляет собой сборку из 4-х shDSL модемов (IEX-402-SHDSL), связанных в одну сеть через Ethernet-коммутатор EDS-405A-T, который объединяет линии данных трех секций в один канал, соединяющий гирлянду с центром кластера.

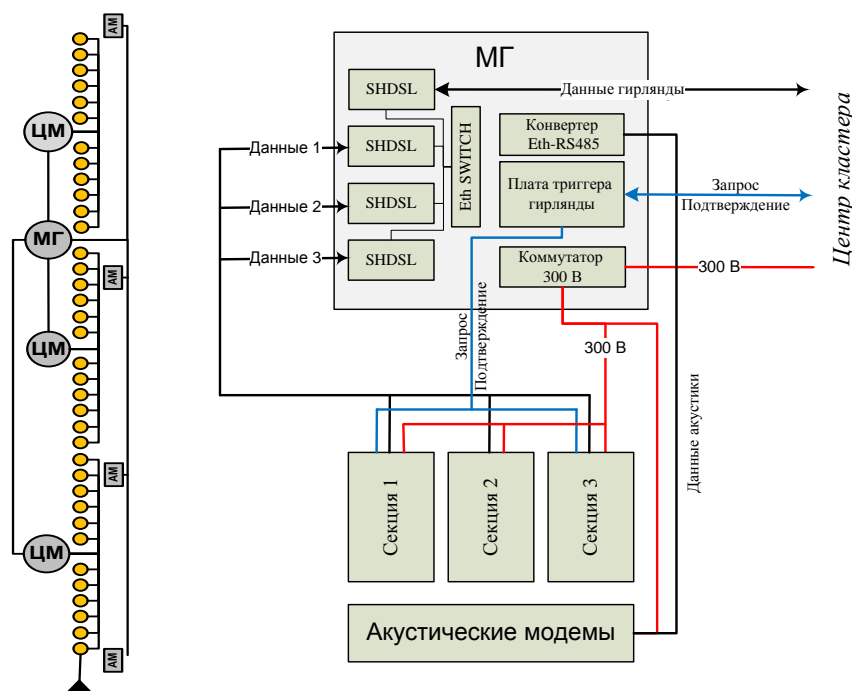


Рис. 4.3.7. Общий вид гирлянды Baikal-GVD и функциональная схема коммутационного модуля гирлянды.

Плата триггера гирлянды (см. параграф 4.1) позволяет формировать из сигналов *запрос*, поступающих от секций, один сигнал *запрос гирлянды*, и разветвлять сигнал *подтверждение* (общий триггер установки) на каждую секцию. Управляемый 12-канальный коммутатор электропитания 300 В позволяет независимо включать и выключать питание секций (используются две линии электропитания для каждой секции, обеспечивающие возможность независимого включения ОМ и платы БСД-12) и акустических модемов. Подключение акустических модемов к системе сбора данных гирлянды осуществляется через 2-канальный преобразователь СОМ-портов в Ethernet: Моха NPort IA 5250 (см. таблицу 4.1.1). Для подключения четырех АМ используется два кабеля (см. рисунок 4.3.7), через которые подается электропитание 300 В индивидуально на каждый модем и передаются данные по общей шине RS-485.

Внешний вид коммутационного модуля гирлянды, размещенного в глубоководном корпусе, показан на рисунке 4.3.8.



Рис. 4.3.8. Коммутационный модуль гирлянды в глубоководном корпусе.

Кластер Baikal-GVD. Базовая конфигурация кластера Baikal-GVD включает в свой состав 8 гирлянд, центр сбора данных кластера (ЦК) и электрооптический кабель, который связывает кластер с Береговым центром сбора данных (БЦ). Центр сбора данных кластера располагается вблизи поверхности воды на глубине ~25 м. В его состав входят 4 электронных модуля, размещенных в разных глубоководных корпусах: *модуль данных*

(МД), *триггерный модуль (ТМ)*, *модуль электропитания (МП)* и опто-электрическая подводная муфта (*оптический наконечник*). Функциональная схема электроники центра кластера показана на рисунке 4.3.9.

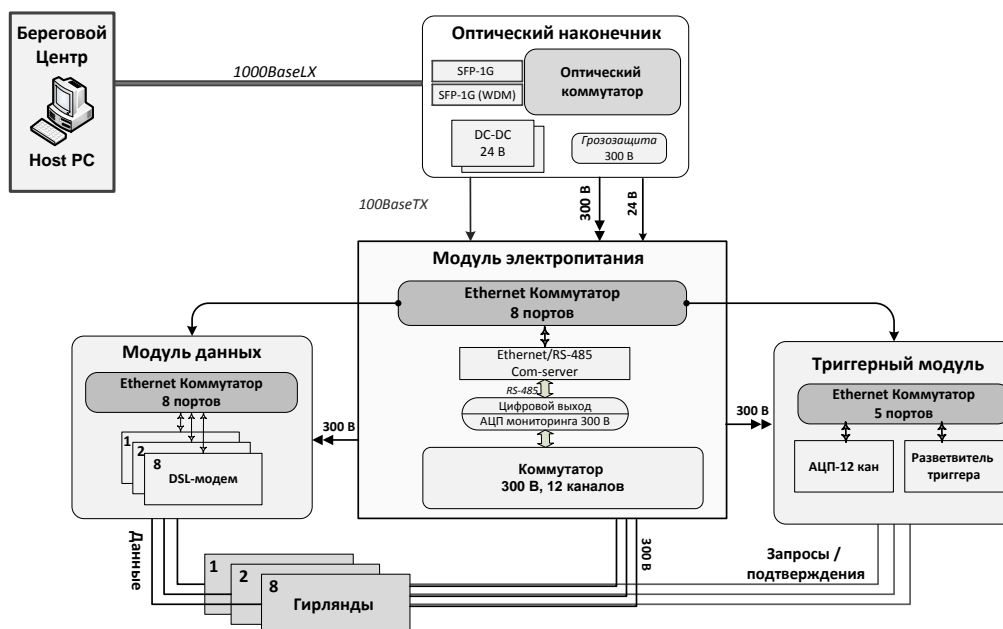


Рис. 4.3.9. Функциональная схема электроники центра сбора данных кластера.

Подключение гирлянд к центру сбора данных кластера производится посредством кабелей длиной ~ 1 км, по которым передаются данные, электропитание 300 В и триггерные сигналы (*запрос* и *подтверждение*). Подсоединение кабелей к модулям ЦК (ТМ, ДМ, ПМ) осуществляется через кабельные разветвители (“*четверники*”).

Электропитание гирлянд осуществляется через модуль ПМ. В его состав входит 12-канальный коммутатор электропитания 300 В (один канал на гирлянду) и 20-канальный промышленный блок АЦП для мониторинга напряжений на выходах коммутатора. Управление коммутатором осуществляется по шине RS-485 через преобразователь NPort 5150A.

Модуль данных предназначен для сбора информации со всех гирлянд кластера. В его состав входят восемь shDSL-модемов с регулируемой скоростью передачи данных (максимальная скорость передачи ~ 10 Мбит/сек).

Сигналы *запрос* от гирлянд поступают в триггерный модуль, на входы платы БСД-12, функцией которой является проверка условий формирования общего триггера установки (сигнала *подтверждение*). Триггерная логика платы БСД-12 позволяет реализовывать различные варианты триггерных условий: совпадения *запросов* от гирлянд в заданном временном окне или формирование сигнала *подтверждение* при поступлении хотя бы одного *запроса*. Сигнал *подтверждение* с выхода БСД-12 поступает на триггерную плату (см. рисунок 4.1.4), на которой он разветвляется на восемь гирлянд кластера.

Центр кластера соединяется с береговым центром сбора данных посредством электрооптического кабеля длиной ~6 км. В состав кабеля входят три пары оптических волокон и шесть медных токопроводящих жил. Подключение кабеля к модулям центра кластера осуществляется через *оптический наконечник*. Внешний вид и блок-схема подводного *оптического наконечника* представлена на рисунке 4.3.10. Электроника оптического наконечника размещается в стальном нержавеющем корпусе. В ее состав входит сетевой коммутатор MOXA EDS-G308-2SFP-T, источники питания и SFP-модули.

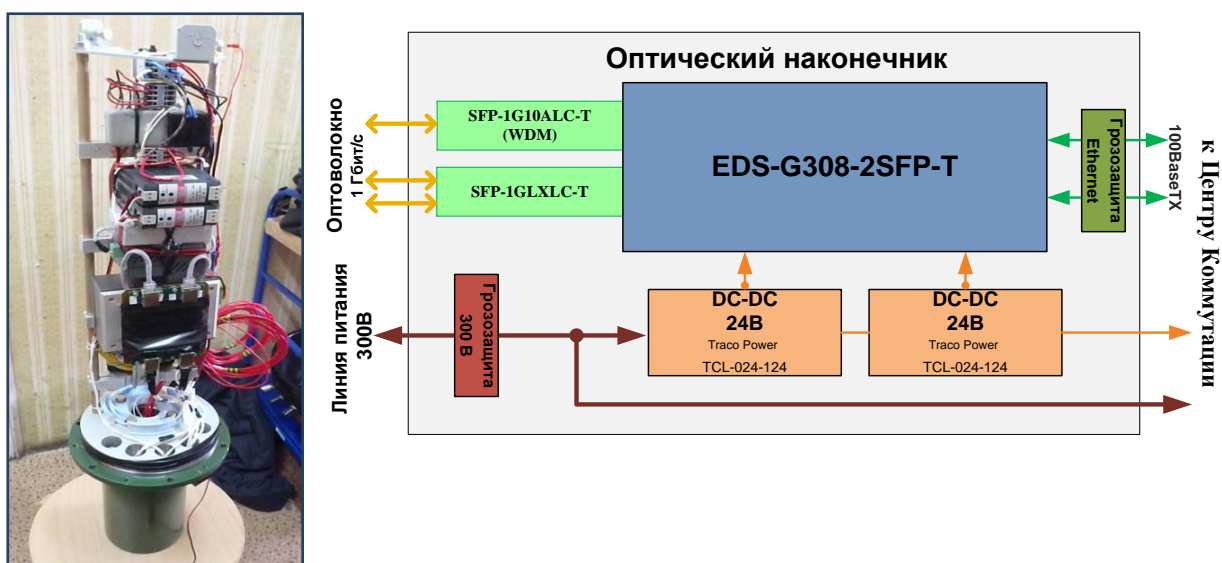


Рис. 4.3.10. Внешний вид и блок-схема оптического наконечника.

Коммутатор EDS-G308-2SFP-T имеет 6 портов Fast Ethernet и два Combo Gigabit порта для подключения различных SFP интерфейсных модулей под одномодовое или многомодовое оптическое волокно. Коммутатор оснащен резервированными входами электропитания и подключён к двум источникам питания Traco Power (24 В). Преобразование электрического сигнала в оптический происходит в SFP модулях двух типов: один из них (SFP-1GLXLC-T) работает в стандартном режиме с использованием пары волокон для передачи в прямом и обратном направлениях (основная линия данных), другой (SFP-1G10ALC-T WDM) работает по технологии спектрального уплотнения каналов и использует только одно оптоволокно (резервная линия данных). Оптические сигналы распространяются к сетевому коммутатору Берегового центра по одномодовым волокнам AllWave® FLEX ZWP с рабочим диапазоном длин волн 1275 - 1625 нм. Пропускная способность оптических линий составляет 1 Гбит/с.

Для защиты линий данных и электропитания от грозовых разрядов и скачков напряжения в оптическом наконечнике предусмотрены устройства защиты от импульсных перенапряжений (*модули грозозащиты*).

Система управления электропитанием кластера. Концепция системы управления электропитанием кластера также как и регистрирующей системы телескопа в целом основана на базовых принципах построения иерархических структур, где каждый элемент системы более низкого уровня находится под управлением элемента более высокого уровня. Электропитание аппаратуры кластера осуществляется от берегового источника питания (БИП) с выходным постоянным напряжением до 500 В, которое подается на аппаратуру кластера через 6-километровый магистральный электрооптический кабель. Величина выходного напряжения БИП автоматически настраивается так, чтобы напряжение на выходе кабеля составляло значение 300 В. Чтобы обеспечить такое выходное напряжение в базовой конфигурации кластера при падении напряжения на магистральном

кабеле 150 В выходное напряжение берегового источника питания (БИП) необходимо поддерживать на уровне 450 В.

Система электропитания кластера разделена на два уровня (рисунок 4.3.11). Первый уровень включает в себя управляемый 12-канальный коммутатор электропитания гирлянд (300 В), который размещен в центре сбора данных кластера. Аналогичные коммутаторы второго уровня установлены на каждой гирлянде в глубоководных модулях коммутации гирлянд - МГ. Они позволяют производить независимое включение и отключение электропитания секций. Включение электропитания оптических модулей (12 В) производится через плату управления центрального модуля секции. Такая организация электропитания обеспечивает устойчивую работу системы в целом при выходе из строя отдельных ее элементов (гирлянд, секций, оптических модулей). Возможность удаленного отключения электропитания отдельных узлов установки особенно актуальна в условиях работы под водой, когда нарушение герметичности глубоководных модулей или элементов кабельных коммуникаций может привести к короткому замыканию линий электропередачи.

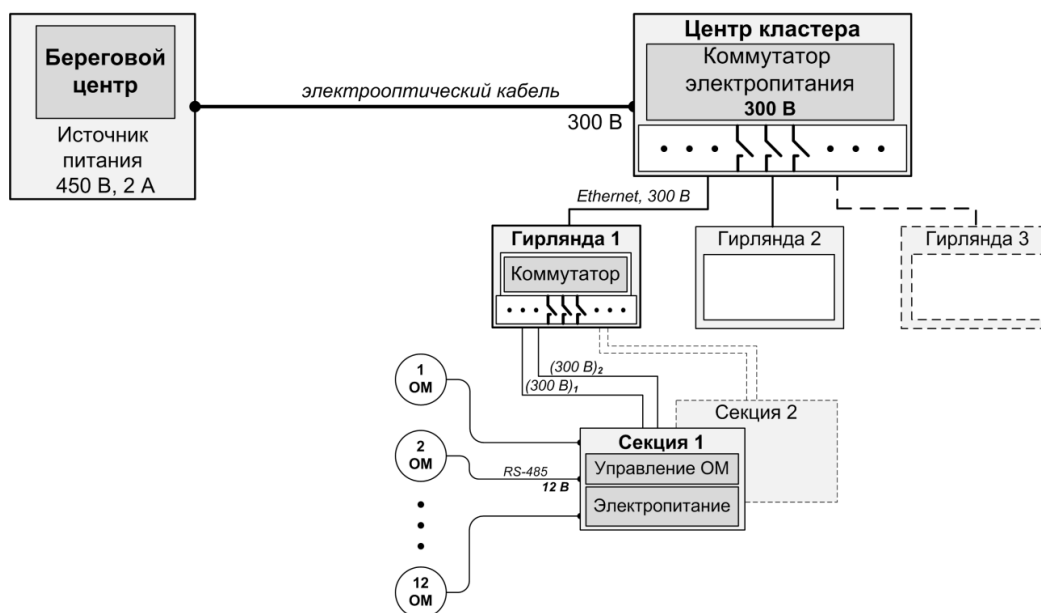


Рис. 4.3.11. Функциональная схема системы электропитания кластера.

Функциональная схема коммутатора электропитания приведена на рисунке 4.3.12. Независимое включение и выключение каждого канала осуществляется по локальной сети Ethernet через COM-сервер (преобразователь Ethernet-RS485) и I-порт (промышленный модуль дискретного 16-канального вывода ICP DAS I-7045). Мониторинг уровня напряжений на выходах коммутатора осуществляется 20-канальным модулем аналогового ввода ICP DAS I-7017Z (напряжение 300 В для этого понижается на прецизионном высокоомном делителе в 60 раз).

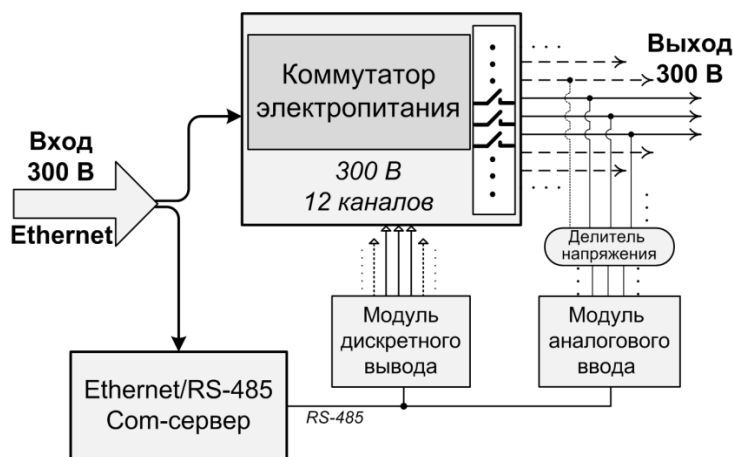


Рис. 4.3.12. Функциональная схема коммутатора электропитания.

Выводы к Главе 4.

Архитектура системы сбора данных (ССД) Baikal-GVD оптимизирована с учетом конкретных условий развертывания и эксплуатации установки: проведение монтажных и профилактических работ с ледяного покрова оз. Байкал. Система сбора данных телескопа имеет модульную структуру. Основными ее структурными элементами являются секция, гирлянда и кластер оптических модулей. Модульная структура ССД позволяет изменять конфигурацию телескопа в зависимости от класса решаемых задач и проводить физические исследования уже на ранних этапах развертывания полномасштабной установки.

Измерительные каналы установки реализованы на основе наносекундных аналогово-цифровых преобразователей, позволяющих

получать максимально полную информацию о событии: временные кадры каналов во временном окне до 5 мкс при частоте дискретизации 200 МГц.

В результате проведенных исследований были разработаны и созданы надежные унифицированные электронные модули для управления и обслуживания работы секций, гирлянд и кластера в целом. Электронные модули включают в свой состав как специально разработанные блоки (платы БСД-12, управления ОМ, триггерной логики, коммутаторов электропитания), так и блоки промышленной электроники (конверторы, источники питания и др. элементы).

Использование экономичных линий передачи данных на основе shDSL технологии в сочетании с методикой выделения сигналов из временных кадров каналов на аппаратном уровне обеспечило достижение скорости передачи данных достаточной для устойчивой работы телескопа при частоте формирования триггерных событий на уровне ~ 2 кГц. Это позволяет устанавливать пороги регистрации каналов на минимальном (одноэлектронном) уровне.

Аппаратура всех базовых элементов ССД (измерительного канала, триггерной системы, системы передачи данных и др.) оснащены функционалом удаленной настройки параметров и/или загрузки внутренних программ управления. Такой подход обеспечивает возможность простого реконфигурирования системы и оптимизации ее параметров в зависимости от условий регистрации и класса решаемых физических задач.

Глава 5. Натурные испытания аппаратуры нейтринного телескопа Baikal-GVD

В главе представлены результаты натурных испытаний аппаратуры Baikal-GVD, которые проводились в период с апреля 2012 по июнь 2017 года в оз. Байкал. На первом этапе работ (2012 – 2014 гг.) испытания проводились на отдельных гирлянд, а начиная с 2015 года - на первых кластерах Baikal-GVD. Программа испытаний включала в себя проверку корректности функционирования основных элементов и систем телескопа в режиме долговременной экспозиции, оценку их надежности и стабильности, анализ качества экспериментального материала, полученного на установке в различных режимах ее работы.

5.1. Этапы развертывания установки и полученный экспериментальный материал

Датой начала работ по систематическому исследованию характеристик регистрирующей системы нейтринного телескопа Baikal-GVD в режиме долговременной экспозиции можно считать апрель 2012 года, когда в оз. Байкал была установлена первая гирлянда из 24 оптических модулей на базе ФЭУ R7081-NQE [78]. На основании опыта ее эксплуатации была модернизирована электроника системы сбора и обработки данных: увеличена производительность микросхем ПЛИС плат АЦП. Это позволило проводить первичную обработку данных (выделение сигналов из временных кадров) в режиме реального времени, что обеспечило стабильную работу системы передачи данных в условиях однофотозлектронных порогов регистрации каналов.

В период 2013 – 2014 гг. в оз. Байкал были последовательно размещены четыре гирлянды, которые вошли в состав первого кластера Baikal-GVD. Центр сбора данных кластера (ЦК) был размещен на глубине ~25 метров и соединен с Береговым центром (БЦ) гибридным оптоэлектрическим

береговым кабелем. На рисунке 5.1.1 представлены конфигурации установки 2012 – 2014 годов [86, 89, 103].

В 2014 году были испытаны первые платы 12-канальных АЦП на базе двухканальных 12-битных микросхем AD9613. Испытания новой электроники прошло достаточно успешно и в 2015 году три новые гирлянды были полностью оснащены 12-канальными платами АЦП. Следует отметить, что потребовалась модернизация только электронных узлов системы сбора и передачи данных. Электроника оптических модулей с 2012 года практически не менялась.

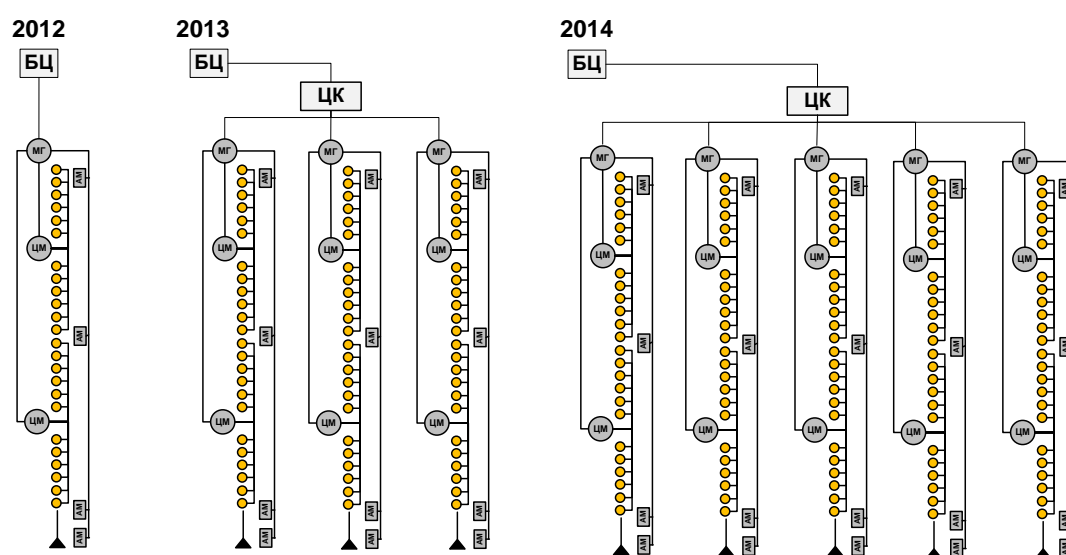


Рис. 5.1.1. Конфигурации установки 2012 – 2014 годов.

Этапы дальнейшего развертывания установки и базовые конфигурации нейтринного телескопа период с 2015 по 2017 год представлены в таблице 5.1.1.

Таблица 5.1.1. Конфигурации установки Baikal-GVD

Характеристики установки	2015 г.	2016 г.	2017 г.
Количество оптических модулей	192	288	576
Геометрические размеры, м	Ø40×345	Ø60×525	Ø60×525×2
Эффективный объем для ливней ($E_{sh} > 100$ ТэВ)	0,03 км ³	0,05 км ³	0,1 км ³

В апреле 2015 года был завершен монтаж первого кластер Baikal-GVD “Дубна” [104 - 106]. Конфигурация кластера представлена на рисунке 5.1.2.

Он состоял из восьми гирлянд по 24 ОМ каждая, расположенных на расстоянии 40 м друг от друга. Высота кластера (длина гирлянд) составляла 345 метров. В течение года работы на первом кластере было проведено 622 сеансов измерений (в том числе 153 в калибровочных и тестовых режимах работы). Живое время экспозиции составило 213 дня. За время измерения было зарегистрировано 1.8×10^9 событий. Триггерным условием являлось совпадение любой пары соседних каналов секций с порогами от 0,5&3 ф.э. до 1,5&4 ф.э. (основной режим работы). Пороги выбирались таким образом, чтобы частота регистрации событий составляла величину ~ 100 Гц. В этом случае кратковременный рост темпа счета триггерных сигналов из-за увеличения интенсивности свечения воды оз. Байкал не выводит систему сбора данных установки из стабильного режима работы. Общий триггер установки формировался по любому сигналу *запрос* секции, поступающему в центр сбора данных кластера.

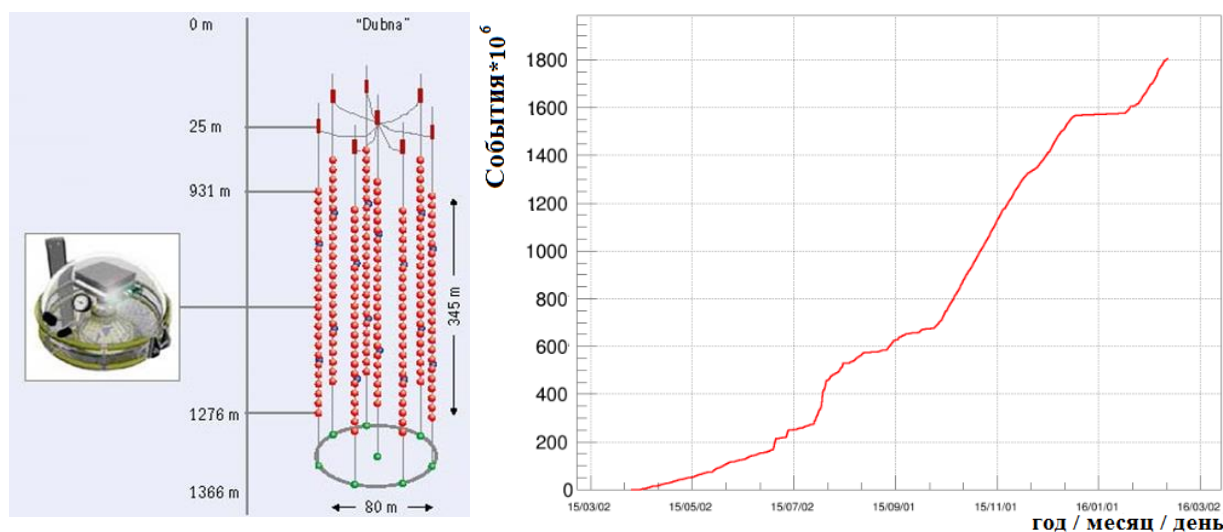


Рис. 5.1.2. Конфигурация кластера “Дубна” и количество событий, зарегистрированных в период с апреля 2015 по март 2016.

Изменение частоты регистрации событий в течение года (см. рисунок 5.1.2) было связано как с изменением порогов регистрации (в середине июля был проведен ряд тестовых серий измерений с предельной частотой регистрации событий), так и с увеличением интенсивности фонового

свечения воды оз. Байкал в октябре 2015 года. Отсутствие данных с конца декабря по середину января 2016 года было обусловлено выходом из строя аппаратуры компьютерного комплекса берегового центра сбора данных, полное резервирование которого к этому моменту времени еще не было закончено.

Развертывание первого кластера Baikal-GVD производилось поэтапно, одновременно с отладкой и модернизацией аппаратуры системы сбора данных телескопа. В результате в его состав входят разные версии плат АЦП, выполненные на различной элементной базе. Для обеспечения совместимости внутренних программ (*прошивок*), загружаемых в ПЛИС плат АЦП, проводилась их периодическая модернизация с последующим тестированием на лабораторных стендах и в составе установки. В 2015 году была выявлена ошибка в *прошивке*, которая привела к снижению надежности работы плат АЦП: периодической потери связи по каналу Ethernet в условиях регистрации пуассоновского потока событий. Для восстановления связи требовалось выключение электропитания устройств. В течение года эта ошибка была устранена и надежность работы системы сбора данных восстановлена. Другой проблемой, которая была диагностирована в процессе эксплуатации первого кластера, явилась низкая надежность плат БСД-12 первой версии, оснащенных одной микросхемой ПЛИС. Повышенная температура микросхемы приводила к периодическим сбоям в работе внутренних программ устройств. В результате две платы БСД-12 первой версии были исключены из конфигурации кластера, что привело к потере 24-х измерительных каналов. Платы БСД-12 второй версии, изготовленные с двумя микросхемами ПЛИС, в период с 2015 по 2107 годы работали надежно.

Опыт развертывания и эксплуатации первого кластера показал принципиальную возможность увеличения инструментальной длины составляющих его гирлянд. Увеличение трудоемкости монтажа гирлянд за счет увеличения длины глубоководных кабельных коммуникаций

компенсируется экономией времени на подготовку несущих конструкций телескопа и прокладку *береговых* кабелей в случае увеличения числа кластеров. Эксперимент по увеличению длин гирлянд был успешно проведен во время экспедиции на оз. Байкал 2016 года. На все гирлянды кластера были установлены дополнительные верхние секции по 12 оптических модулей каждая. Кроме того, расстояние между гирляндами было увеличено с 40 метров до проектной величины - 60 метров. Кластер в новой конфигурации (см. рисунок 5.1.3) успешно эксплуатируется с апреля 2016 года. В его состав входит восемь гирлянд с тремя секциями ОМ длиной 525 м (в общей сложности 288 оптических модулей). Радиус кластера составляет 60 метров, эффективный объем для регистрации ливней с энергией 10^2 ТэВ – $0,05 \text{ км}^3$. Общий объем набранной статистики в 2016 году превысил $1,5 \times 10^9$ событий при живом времени экспозиции 235 дней.

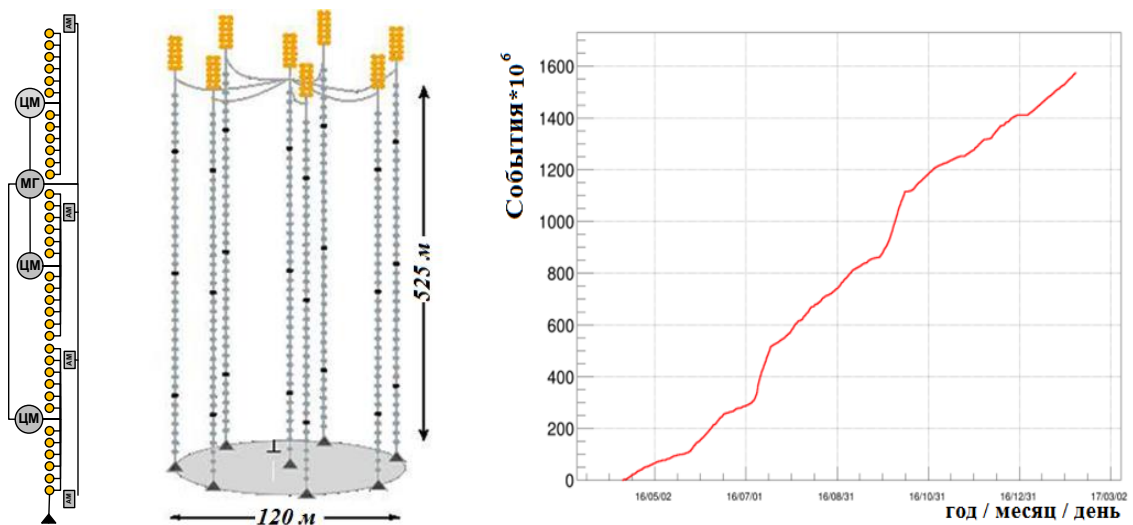


Рис. 5.1.3. Общий вид гирлянды с тремя секциями ОМ (слева), конфигурация кластера 2016 (в центре) и статистика набора экспериментальных данных.

Позитивный опыт развертывания кластера с гирляндами из трех секций позволил оптимизировать конфигурацию первой очереди установки: GVD-1 (см. рисунок 2 3.1). При сохранении общего числа оптических модулей (2304 ОМ) и эффективного объема установки, количество кластеров было уменьшено с двенадцати (24 ОМ в гирлянде) до восьми (36 ОМ в гирлянде). Оптимизированная конфигурация GVD-1 представлена на рисунке 5.1.4.

Треугольниками показаны станции гирлянд оптических модулей, кружками – установленные в настоящее время кабельные станции. Радиус кластеров 60 метров, расстояния между их центрами 300 метров.

Во время экспедиции 2017 года был введен в эксплуатацию второй кластер Baikal-GVD в новой конфигурации (288 ОМ). На рисунке 5.1.4 представлена схема размещения первых двух кластеров в оз. Байкал. Каждый кластер состоит из 8 гирлянд ($S_1 \dots S_8$) и центра управления, расположенного на центральной, восьмой, гирлянде. Центры управления кластеров связаны с береговым центром отдельными гибридными оптоэлектрическими кабелями, проложенными по дну оз. Байкал. Для подключения кабелей к центрам сбора данных кластеров были смонтированы кабельные станции, позволяющие поднять кабель на требуемый уровень: ~25 метров от поверхности озера. Суммарный эффективный объем установки для регистрации ливней в 2017 году составил $0,1 \text{ км}^3$.

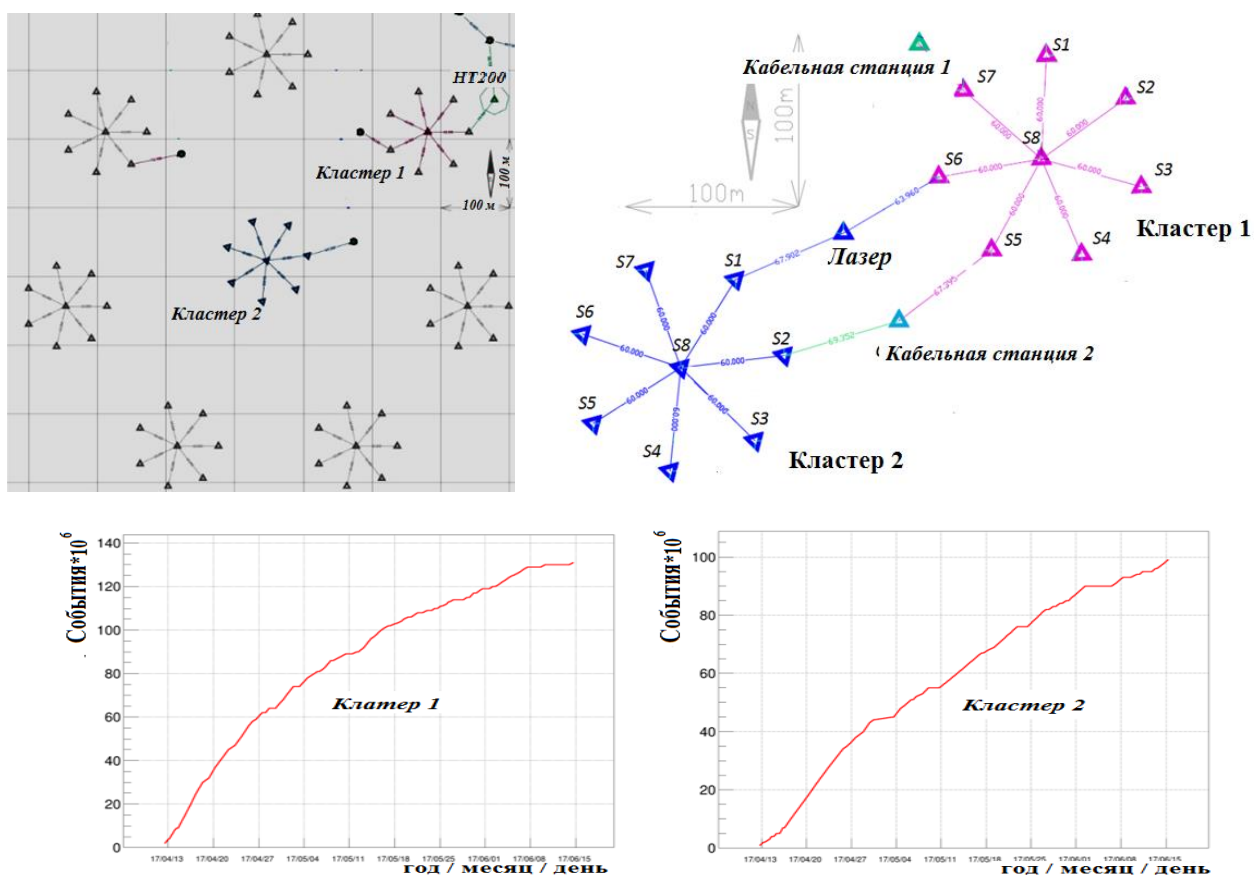


Рис. 5.1.4. Конфигурация первой очереди GVD-1, схема размещения первых двух кластеров нейтринного телескопа и статистика набора данных в период с апреля по июнь 2017 года.

На отдельной станции (*лазерная гирлянда*) в 2017 году была смонтирована вспомогательная аппаратура, предназначенная для калибровки и временной синхронизации кластеров: лазерный и светодиодный источники света. Для измерения их координат на *лазерной гирлянде* были установлены два дополнительных модема акустической системы позиционирования. В таблице 5.1.2 представлена статистика работы двух кластеров в период с 13 апреля (ввод установки в эксплуатацию) по 15 июня 2017 года.

Таблица 5.1.2. Статистика работы двух кластеров в период с 13 апреля по 15 июня 2017 года

	Время работы, сутки	Эффективность, %	Статистика, события
Кластер 1	64,3	84,4	$1,3 \times 10^8$
Кластер 2	64,0	87,6	$1,0 \times 10^8$

Анализ качества экспериментального материала

Для анализа качества полученного экспериментального материала использовались данные мониторинга состояния аппаратуры и условий регистрации (напряжение на ФЭУ, температура электроники, темп счета измерительных каналов и т. п.), и результаты статистической обработки временных и амплитудных распределений зарегистрированных событий. Стандартным подходом к первичному статистическому анализу экспериментальных данных является проверка пуассоновского характера потока зарегистрированных событий. Для этого анализа были использованы распределения временных интервалов между событиями и распределения по количеству событий, зарегистрированных за фиксированный интервал времени. Примеры распределений временных интервалов между событиями показаны на рисунке 5.1.5 для двух серий измерений: Run #340 (8.09.2015, частота регистрации событий ~ 70 Гц) и Run #567 (2.11.2015, частота ~ 150 Гц). Экспоненциальный вид распределений указывает на отсутствие коррелированных во времени событий. На рисунке 5.1.6 представлен пример

распределения по количеству событий, зарегистрированных за фиксированные интервалы времени (серия измерений Run #340). Интервал времени выбран таким образом, чтобы в нем регистрировалось в среднем ~20 событий. Полученное распределение согласуется с распределением Пуассона (сплошная линия).

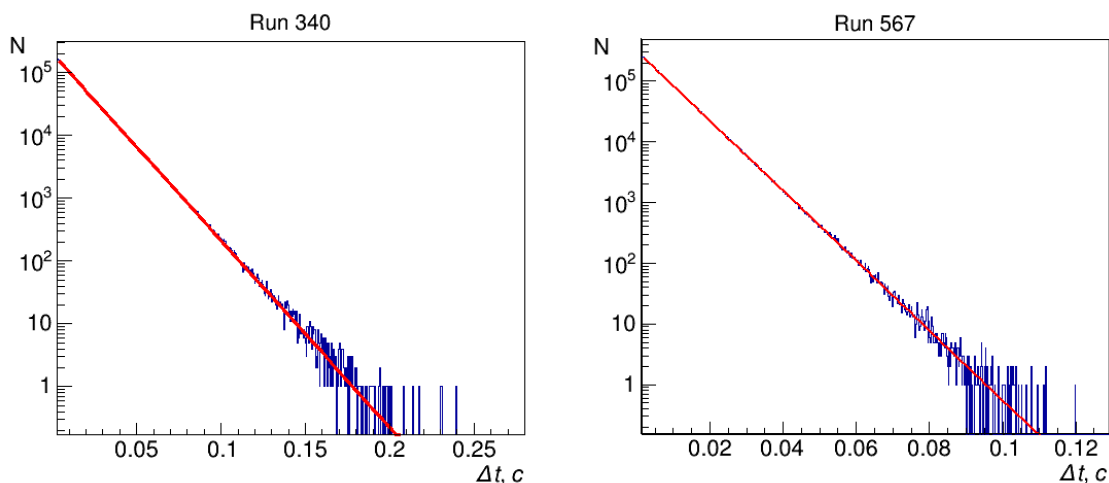


Рис. 5.1.5. Примеры распределений временных интервалов между событиями. Сплошная линия – аппроксимация экспонентой.

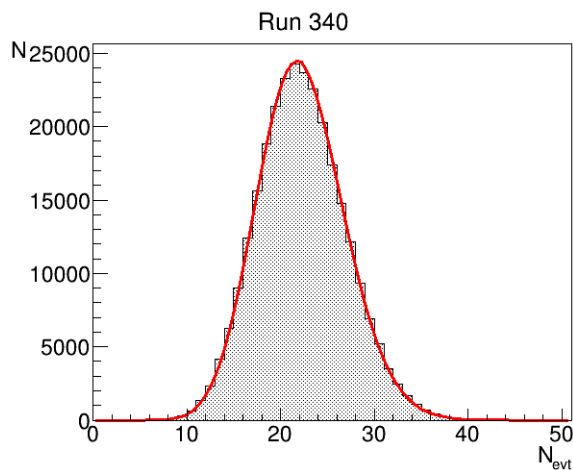


Рис. 5.1.6. Распределение по количеству событий, зарегистрированных за фиксированные интервалы времени (0.31 сек) в серии измерений Run #340 (сплошная линия – распределение Пуассона).

Кроме стандартных подходов применялись методы проверки качества экспериментального материала, учитывающие специфику системы сбора данных Vaikal-GVD. Одним из них является проверка корректности формирования физических событий. Данные от секций установки поступают

в Береговой центр сбора данных асинхронно, в виде *мастерных записей*. Для объединения *мастерных записей* в физическое событие используется информация о номере общего триггера, содержащегося в каждой записи. Однако возможные сбои в работе счетчиков могут исказить последовательность номеров записей. Для проверки корректности объединения записей в события использовалась информация о временах регистрации событий. Таймеры плат БСД-12 секций не синхронизованы, поэтому для проверки использовались не абсолютные времена, а разности временных интервалов dt между последовательными записями от разных секций: так, для секций i и j разность интервалов $\Delta t_{ij} = dt_i - dt_j$.

Для корректно сформированных событий ширина их распределения по параметру Δt определяется частотой внутренних таймеров секций (100 МГц) и разбросом времени регистрации триггера, связанным с флуктуациями его переднего фронта при прохождении через километровый кабель, и должна составлять величину ~ 10 нс. В том случае, если объединяются записи из разных событий (некорректное формирование событий), ширина распределения Δt определяется частотой поступления триггерных сигналов f_{trig} . При $f_{trig} \sim 100$ Гц величина Δt достигает 10 мс. Корректность объединения событий в каждой серии измерений определялась по величине среднеквадратичного отклонения $\sigma(\Delta t)$. На рисунке 5.1.7 представлен пример распределения событий по Δt для двух секций установки.

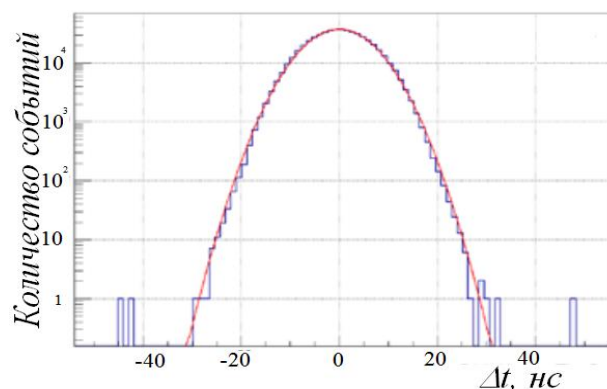


Рис. 5.1.7. Пример распределения событий по параметру Δt (см. текст).

В таблице 5.1.3 представлены среднеквадратичные отклонения Δt -распределений для 20 секций $\sigma(\Delta t)$, полученные по одной из серий измерений. Значение Δt вычислялось относительно таймера центра кластера (АЦП №190).

Таблица 5.1.3. Среднеквадратичные отклонения распределений разности временных интервалов между последовательными мастерными записями

№АЦП секции	220	208	195	211	219	197	212	207	217	204
$\sigma(\Delta t)$, нс	5,4	5,8	6,0	5,7	5,7	5,7	5,6	6,0	5,8	5,6

№АЦП секции	209	202	216	192	210	214	222	215	213	221
$\sigma(\Delta t)$, нс	6,0	5,6	5,8	5,6	6,3	5,7	5,7	5,8	5,6	5,8

Полученные данные указывают на корректность процедуры формирования физических событий.

Для контроля работы аппаратуры и условий ее функционирования использовались данные, формируемые контроллерами оптических модулей (*мониторные данные*). На рисунке 5.1.8 в качестве примера представлены результаты годового мониторинга параметров двенадцати ОМ (одна секция установки): напряжения электропитания, температуры на плате контроллера, высоковольтного напряжения ФЭУ и темпа шумовых срабатываний оптического модуля. Стабильность напряжением электропитания ОМ необходима для надежной работы электроники оптического модуля. Для электропитания оптического модуля требуется напряжение $12 \text{ В} \pm 10\%$. В течение годовой эксплуатации измеренная величина напряжения составила величину $12 \pm 0,1 \text{ В}$, что на порядок превосходит требуемую стабильность. Разброс абсолютных значений напряжений на ОМ ($\sim 0,2 \text{ В}$) связан с различным падением напряжения на кабелях ОМ, которое, в свою очередь, зависит от величины высоковольтного напряжения на ФЭУ (от потребляемой мощности ОМ).

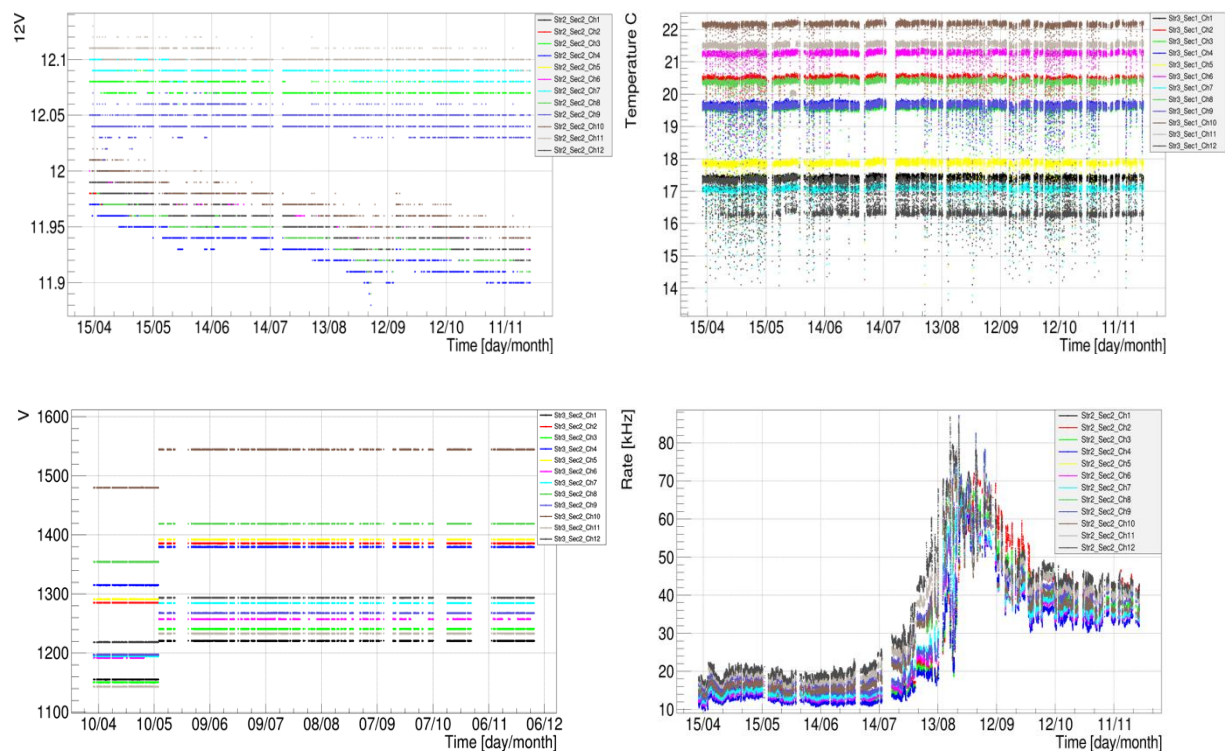


Рис. 5.1.8. Данные годового мониторинга параметров ОМ: напряжения электропитания (слева вверху), температура контроллера (справа вверху), высоковольтного напряжения на ФЭУ (слева внизу) и темпа счета шумов каналов (справа внизу).

Измерение температуры внутри оптического модуля позволяет контролировать условия эксплуатации электроники. Глубоководные корпуса оптических модулей изготовлены из стекла, которое является плохим проводником тепла. Теплообмен уменьшается и за счет снижения давления внутри модуля до 0,7 атм. Несмотря на то, что ОМ эксплуатируются при температуре окружающей среды $\sim 4^{\circ}\text{C}$ и потребляемая мощность ОМ мала (~ 3 Вт), плохой отвод тепла может приводить к существенному повышению температуры внутри ОМ, что снижает срок работы аппаратуры. Следует отметить, что измерения температуры проводятся при помощи датчика, интегрированного в состав микропроцессора ОМ и (как было измерено) его показания примерно на десять градусов превышают температуру окружающей среды. Учитывая этот факт, температура внутри модуля

составляет величину $\sim 10^{\circ}\text{C}$ (близка к оптимальной для работы электроники). Кратковременные снижения температуры, наблюдаемые на графике, обусловлены периодическим выключением электропитания ОМ и соответствуют периодам выхода модулей на стабильный тепловой режим.

Стабильность величины высоковольтного напряжения ФЭУ является необходимым условием стабильности чувствительности установки, т.к. от него зависят коэффициенты усиления каналов и, соответственно, пороги регистрации детектора. При изменении высоковольтного напряжения на 100 Вольт амплитуда выходного сигнала ФЭУ меняется в $\sim 1,8$ раза. При среднем значении высоковольтного напряжения ФЭУ около 1500 В, его изменение на 1% приводит к изменению порога регистрации канала на 10%. Реально измеренные отклонения высоковольтного напряжения от номинального значения составило величину меньшую 0,1%, что соответствует стабильности порогов регистрации на уровне 1%. “Скачкообразное” изменение высоковольтных напряжений на всех каналах в мае 2015 года (см. рисунок 5.1.8) связано с корректировкой настроек каналов детектора.

Важным фактором, влияющим на работу установки, является темп счета шумовых импульсов каналов. Шумовые импульсы влияют на частоту срабатывания триггерной системы установки и точность реконструкции параметров физических событий. Существует два основных источника шумов каналов: собственный темновой ток ФЭУ и свечение воды оз. Байкал. Темп счета импульсов, обусловленных темновым током, составляет величину ~ 5 кГц. Существенно больший вклад дает свечение воды. Его источником являются химические реакции, происходящие в остатках биологических образований, содержащихся в воде (хемилюминесценция). Перенос конгломератов таких образований течениями озера обуславливает высокий уровень флуктуаций фонового свечения и значительные сезонные вариации его средней интенсивности. Результаты годового мониторинга частоты шумовых срабатываний для 12 ОМ, представленные на рисунке

5.1.8, достаточно хорошо отражают общее поведение всех каналов установки: стабильный темп счета шумов в период апрель – июль (15 – 20 кГц для разных каналов), резкое увеличение уровня шумов в период август – сентябрь (до 60 – 70 кГц) и их дальнейшая стабилизация на уровне ~40 кГц. Временная корреляция шумовых пиков на разных каналах говорит о преимущественном вкладе в частоту шумовых срабатываний естественного свечения Байкальской воды.

Следует отметить, что исследование переменной составляющей фонового свечения воды оз. Байкал имеет важное прикладное значение. Наблюдение за изменениями темпа счета фона, измеряемыми распределенными в пространстве оптическими модулями, позволяет исследовать долговременную динамику и сезонные вариации течений на больших глубинах озера. В настоящее время формируется архив данных мониторинга фоновых шумов, который будет использован для этих исследований.

Надежность работы измерительных каналов

Надежность работы измерительных каналов является основным фактором, определяющим надежность работы телескопа в целом. Требования к надежности каналов следуют из возможностей их ремонта во время эксплуатации телескопа. На основании имеющегося опыта демонтажа и монтажа гирлянд оптических модулей в целях ремонта аппаратуры, требуемую надежность можно оценить на уровне $10^{-2} \frac{\text{отказов}}{\text{год}}$. Теоретическая оценка надежности элементов электроники измерительных каналов проводилась по методике FIDES [107]. Эта методика основывается на физических моделях работы электроники и ее отказов, данных тестирования элементов электронных схем и информации об отказах при длительном использовании оборудования. В результате расчетов было получено, что ожидаемое количество отказов измерительных каналов составляет величину

$1,3 \times 10^{-2} \frac{\text{отказов}}{\text{год}}$ [108]. Эта величина определяется следующими факторами:
 $7 \times 10^{-3} \frac{\text{отказов}}{\text{год}}$ - отказы оптических модулей, $2 \times 10^{-3} \frac{\text{отказов}}{\text{год}}$ – отказы электроники каналов АЦП и $4 \times 10^{-3} \frac{\text{отказов}}{\text{год}}$ – отказы электроники плат управления ОМ.

Прямая экспериментальная оценка надежности была выполнена на основании анализа неисправностей измерительных каналов и входящих в их состав оптических модулей в период с 2012 по 2015 годы. В таблице 5.1.4 показано количество измерительных каналов, установленных в детекторе с 2012 по 2015 годы, и общее время их работы. К 2015 году общая наработка составила 400 каналов×год. За этот интервал времени вышло из строя 4 измерительных канала, что соответствует уровню надежности $10^{-2} \frac{\text{отказов}}{\text{год}}$.

В 2016 году все гирлянды с неисправными каналами были демонтированы, что позволило проанализировать причины возникновения неисправностей. Было установлено, что только один случай отказа связан с выходом из строя электроники - отказ контроллера ОМ. Два случая отказов обусловлены плохим контактом в разъемах кабельных коммуникаций измерительного канала, и один случай связан с плохим уплотнением глубоководного разъема ОМ (ошибка монтажа). В результате внутри оптического модуля образовался конденсат, что привело к отказу высоковольтной системы электропитания ФЭУ. Следует отметить, что после “просушки” электроники, работоспособность ОМ восстановилась полностью.

Таблица 5.1.4. Данные о работе измерительных каналов с 2012 по 2015 гг.

	2012	2013	2014	2015	Общее к-во
Количество каналов	24	48	40	80	192
Время работы каналов, год	4	3	2	1	-
Общая наработка, каналы×год	96	144	80	80	400
Количество выходов из строя	1	1	2	0	4

На основании полученного экспериментального материала надежность электроники оптических модулей оценивается на уровне $\sim 3 \times 10^{-3} \frac{\text{отказов}}{\text{год}}$.

Следует отметить, что при оценке надежности не учитывались каналы, входящие в состав 2-х секций первого кластера, которые были исключены из конфигурации из-за сбоев работы плат БСД-12 версии 1. Это обусловлено тем, что использование плат первой версии было прекращено. Во втором кластере был осуществлен полный переход на платы БСД-12 версии 2, при работе которых до настоящего момента времени сбои не были зафиксированы. Дальнейшее увеличение надежности каналов регистрации связано в основном с повышением уровня контроля качества монтажных работ по сборке глубоководных корпусов оптических модулей и управляющей электроники.

5.2. Работа установки в калибровочных режимах

Программа исследований аппаратуры нейтринного телескопа в калибровочных режимах работы включала в себя проверку и оптимизацию методов амплитудной и временной калибровки измерительных каналов и секций, оценку точности измерения калибровочных коэффициентов и координат оптических модулей, тестирование методов реконструкции событий с использованием калибровочных источников света.

Амплитудная калибровка каналов

Амплитудная калибровка каналов основана на хорошо известной методике измерения одно-фотоэлектронных спектров (о.ф.с.) – амплитудных распределений, полученных в режиме регистрации единичных фотоэлектронов. Пример о.ф.э. спектра для ФЭУ R7081-100 представлен на рисунке 5.2.1. В результате анализа о.ф.с. определяются средние значения зарядов фотоэлектронов, измеренные в кодах АЦП (Q_{1e}). Параметры Q_{1e} представляют собой амплитудные калибровочные коэффициенты, которые используются для определения количества фотоэлектронов,

сформировавших импульсы на каналах. Для вычисления потока черенковских фотонов, падающего на фотокатод ФЭУ, используется информация о его квантовой чувствительности. Измерение квантовой чувствительности фотокатодов производится фирмой Hamamatsu – поставщиком фотоэлектронных умножителей.

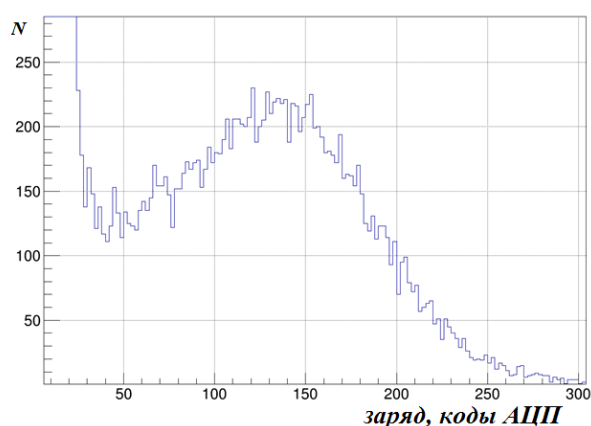


Рис. 5.2.1. Пример калибровочного о.ф.э. спектра ФЭУ R7081-100.

Для измерения о.ф.с. каналов необходим источник, генерирующий такие потоки света, при регистрации которых фотоэлектронным умножителем вероятность выбивания из фотокатода нескольких фотоэлектронов пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью выбивания единичных фотоэлектронов. В качестве такого источника могут быть использованы импульсные светодиоды с регулируемой яркостью, установленные в оптическом модуле. Для измерения о.ф.с. интенсивность источников подбирается таким образом, чтобы вероятность выбивания фотоэлектрона из фотокатода не превышала 10% (так называемый одноэлектронный режим работы канала). Для пуассоновского распределения количества ф.э., доля много-фотоэлектронных импульсов в амплитудном спектре при такой интенсивности вспышек составляет величину около 5%. Этот подход используется при лабораторной калибровке оптических модулей. Однако подбор интенсивности светодиодов, обеспечивающий одноэлектронный режим работы каналов, является достаточно длительной процедурой. Существенно проще в условиях подводного эксперимента использовать

естественное свечение байкальской воды, которое имеет однофотонный характер (в спектре свечения отсутствуют многофотонные вспышки).

Для амплитудной калибровки каналов используется специальный режим работы установки, при котором на все каналы подается общий триггер от “внешнего” источника, независимо от срабатываний каналов. В качестве такого источника в настоящее время используется триггерная плата центра кластера, работающая в режиме генератора (см. рисунок 4.1.4). При поступлении триггерного сигнала на платы АЦП на всех каналах кластера формируются временные кадры длительностью 5 мкс. При средних темпах срабатываний каналов ~ 20 кГц, вероятность наблюдения одноэлектронного сигнала в кадре $\sim 10\%$. Для набора статистически обеспеченного о.ф.э. спектра (~ 1000 событий при относительной ширине о.ф.э. пика около 40%) требуется менее двух минут при частоте формирования триггерных сигналов 100 Гц.

Аппроксимация однофотозлектронного пика распределением Гаусса позволяет определить средний заряд одного фотоэлектрона Q_{1e} , выраженный во временных и амплитудных отсчетах АЦП. Отношение Q_{1e} к заряду электрона с учетом чувствительности АЦП дает коэффициент усиления канала G . На рисунке 5.2.2 представлено распределение каналов по величине коэффициента усиления, полученное по калибровочным данным 2014 года.

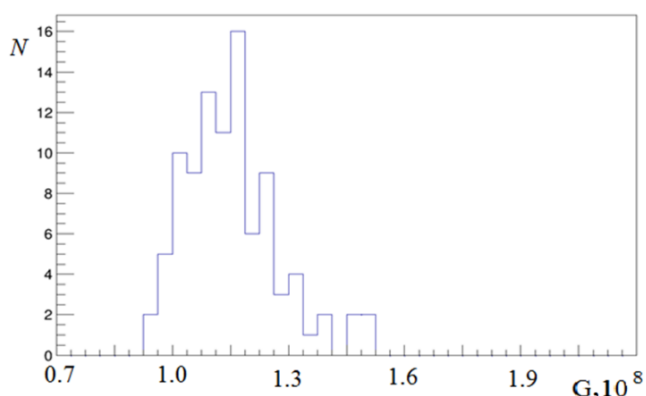


Рис. 5.2.2. Распределение каналов по величине коэффициента усиления G .

Среднее значение коэффициента G по выбранному набору данных составляет величину $1,1 \times 10^8$. Это значение достаточно близко к требуемой величине коэффициента усиления $1,0 \times 10^8$, настраиваемой на этапе лабораторной калибровки оптических модулей. В таблице 5.2.1 представлены средние значения коэффициентов усиления каналов, полученным по трем наборам калибровочных данных. Следует отметить достаточно высокую стабильность данной характеристики ОМ.

Таблица 5.2.1. Усредненные коэффициенты усиления каналов, полученные по данным 2014 года

Дата измерения	12.05.2014	10.06.2014	21.08.2014
G , среднее по каналам	$1,12 \times 10^8$	$1,17 \times 10^8$	$1,14 \times 10^8$
δG , %	9,9	10,1	9,3

Временная калибровка каналов

Временная калибровка каналов заключается в измерении их относительных временных задержек. Величина задержки каналов определяется двумя основными факторами: задержками сигналов в кабелях ОМ и задержкой импульсов в фотоэлектронном умножителе. Кабельные задержки измеряются в лаборатории и не меняются во времени. Задержки ФЭУ зависят от высоковольтного напряжения на делителе и требуют постоянного контроля в процессе работы.

Применяются два метода временной калибровки каналов. Первый метод основан на прямом измерении задержек ФЭУ. Для этого контроллер ОМ формирует специальный тестовый импульс, синхронизованный с запуском светодиода. Этот импульс подается на выход усилителя сигналов ФЭУ. Разница времен dT между сигналом с ФЭУ, генерированным светодиодом, и тестовым импульсом позволяет определить задержку фотоэлектронного умножителя. Пример временного кадра канала, содержащего тестовый

импульс и сигнал с ФЭУ, показан в левой части рисунка 5.2.3. Для того, чтобы избежать наложения импульсов, сигнал запуска светодиода задержан на ~ 500 нс относительно тестового импульса.

Для второго метода временной калибровки используются вспышки светодиодов ОМ, регистрируемые двумя ФЭУ соседних каналов секции. Наложение двух временных кадров соседних каналов (каналы 25 и 26) показано в правой части рисунка 5.2.3. Калибровочный коэффициент определяется как разность между ожидаемой dt_0 и измеренной dt временной задержкой сигналов.

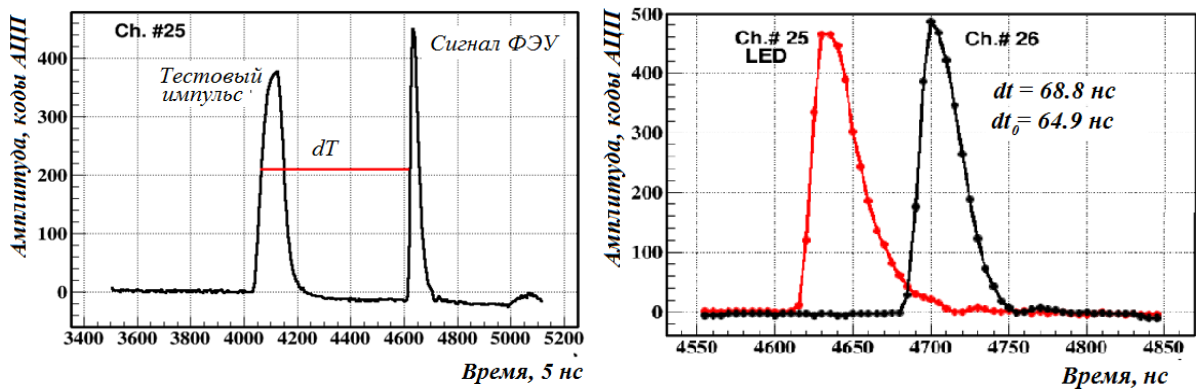


Рис. 5.2.3. Два метода временной калибровки: измерение задержки сигнала ФЭУ относительно тестового импульса (слева) и измерение задержки между импульсами на соседних каналах (справа).

Для оценки точности временной калибровки были сопоставлены результаты, полученные двумя указанными выше методами. Анализ проводился для оптических модулей, установленных на двух гирляндах кластера Baikal-GVD в 2015 году (48 каналов). На рисунке 5.2.4 представлены распределения по разности задержек между соседними каналами, измеренные с помощью светодиодного источника dT_{LED} и с помощью тестового импульса dT_{TST} . На рисунке 5.2.5 показано распределение каналов по разности между калибровочными коэффициентами, полученными двумя способами. Различие между временными сдвигами, полученными независимыми методами, составляет величину ~ 2 нс. Это значение дает верхнюю оценку точности временной калибровки каналов.

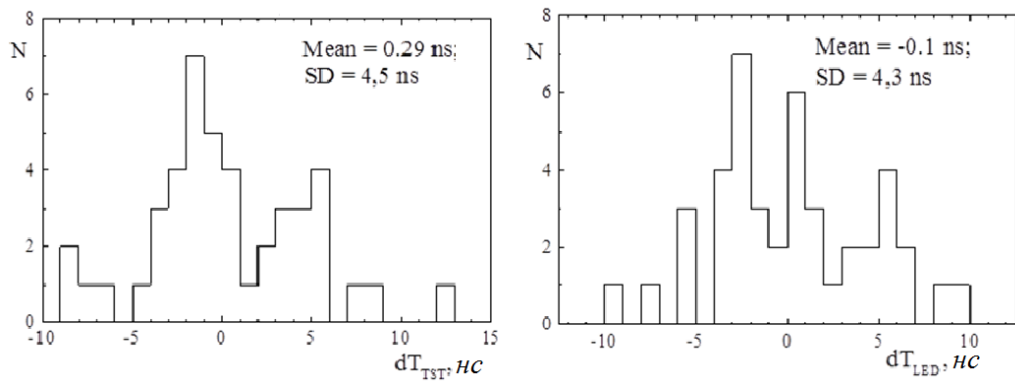


Рис. 5.2.4. Распределения по разности задержек между соседними каналами, измеренные с помощью тестового импульса dT_{TST} и с помощью светодиодного источника dT_{LED} .

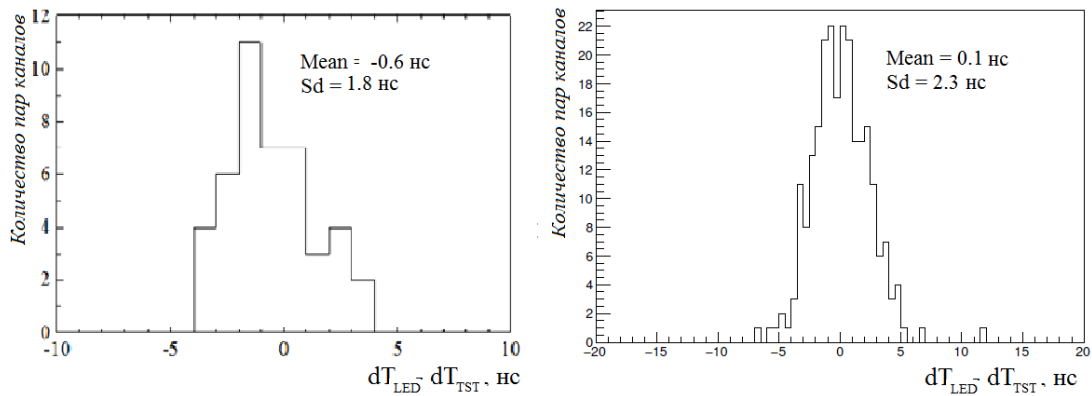


Рис. 5.2.5. Распределение по разности между задержками каналов, полученными при помощи светодиодной калибровки (dT_{LED}) и с использованием тестового импульса (dT_{TST}) для выборочных каналов кластера 2015 года (слева) и всех каналов кластера 2016 года (справа).

Следует отметить, что основной причиной возникновения временных сдвижек между каналами является различие высоковольтных напряжений ФЭУ, обеспечивающее требуемую величину их коэффициента усиления 10^7 . Это иллюстрирует рисунок 5.2.6, на котором показана зависимость задержек каналов, измеренных при помощи тестового импульса, от напряжения на ФЭУ. Для одинаковых значений высоковольтного напряжения разброс временных задержек как правило не превышает 5 нс.

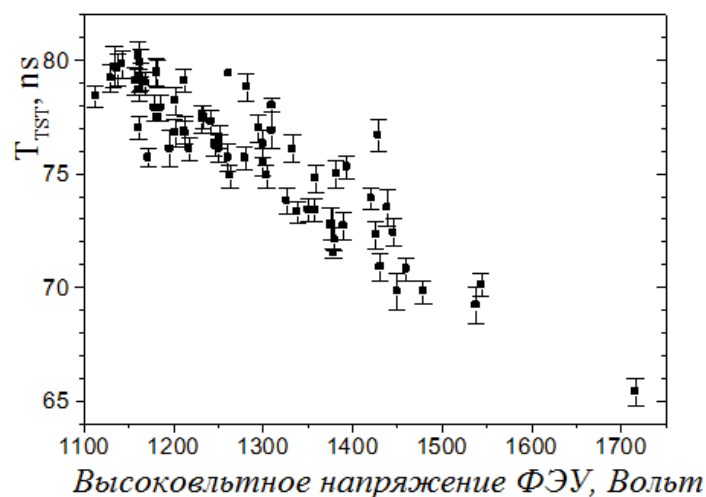


Рис. 5.2.6. Временные задержки каналов в зависимости от напряжения на делителе ФЭУ.

Временная калибровка секций

Для временной калибровки секций использовались светодиодные калибровочные источники, расположенные в отдельных глубоководных корпусах (матрицы светодиодов). Каждая матрица включает в свой состав 12 светодиодов. Шесть светодиодов направлены вверх, обеспечивая засветку ОМ, расположенных на гирлянде, на которой размещается матрица. Шесть светодиодов ориентированы в горизонтальном направлении (азимутальный угол между соседними светодиодами 60°), засвечивая ОМ соседних гирлянд (см. рисунок 5.2.7 (а)). Для определения координат светодиодной матрицы и оптических модулей используются данные, полученные при помощи акустической системы позиционирования. Относительные временные сдвиги секций определяются как разность между ожидаемыми dT_{exp} и измеренными dT временными задержками между сигналами, зарегистрированными на каналах, расположенных в разных секциях.

Рисунок 5.2.7 (б) иллюстрирует методику определения временных сдвижек секций dT_S на примере верхних секций 2-ой и 8-ой гирлянд. Для вычисления dT_S использовалось один канал 8-ой гирлянды (№185) и 9 каналов, расположенных на 2-ой гирлянде. В левой части рисунка

представлены измеренные временные задержки между каналами $(T-T_0)_{185}$ и рассчитанные на основании известного положения источника света и оптических модулей $(T-T_0)_{exp}$.

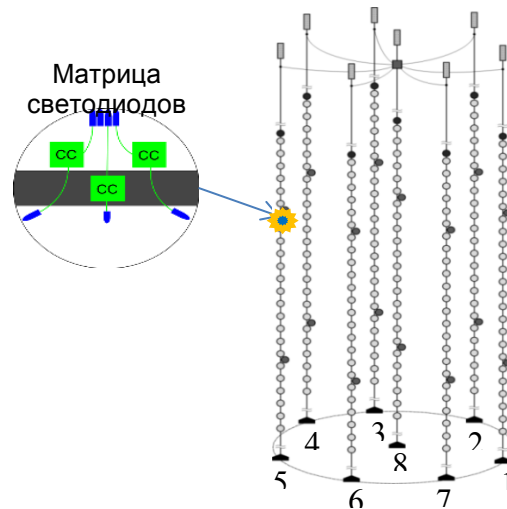


Рис. 5.2.7 (а). Временная калибровка секций при помощи матрицы светодиодов.

На графике, расположенном в правой части рисунка 5.2.7 (б), представлена разность между ожидаемыми и измеренными задержками каналов. Минимальное отклонение расчетных задержек от измеренных получается при временной сдвиге между секциями 142 нс (среднеквадратичное отклонение 1,7 нс).

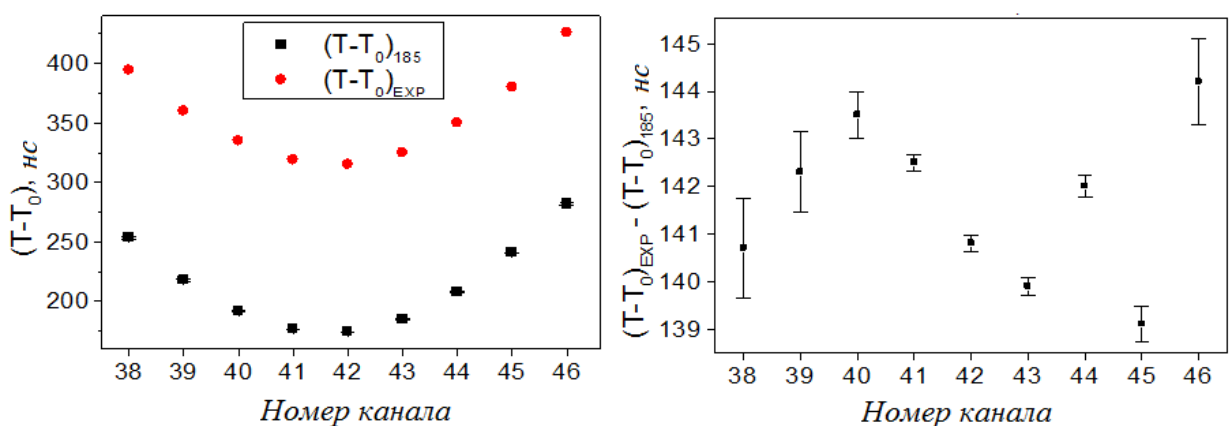


Рис. 5.2.7 (б). Измеренные $(T-T_0)_{185}$ и рассчитанные $(T-T_0)_{exp}$ временные задержки между каналами, расположенными на разных гирляндах (слева) и величина временной сдвиги между секциями, измеренная по разным парам каналов (справа).

Временная сдвигка между секциями 142 нс согласуется с разницей в длинах кабелей, которые используются для их подсоединения к центру кластера (около 30 метров). Следует также отметить, что при определении временных сдвижек между секциями использовались результаты временной калибровки каналов в секциях. Т.е. полученная оценка точности определения временной сдвигки между секциями включает в себя ошибки временной калибровки межканальных сдвижек.

Измерение координат оптических модулей

В отличие от наземных или подземных детекторов космических лучей положение регистрирующих элементов глубоководного нейтринного телескопа нельзя определить точно. Даже в условиях развертывания с ледового покрова оз. Байкал постановка “буйковых” станций не может быть осуществлена с точностью лучше, чем несколько десятков сантиметров. Кроме того, положение оптических модулей изменяется в процессе эксплуатации под воздействием подводных течений. Для того, чтобы неопределенность в значениях координат оптических модулей не оказывала существенного влияния на точность реконструкции событий, она не должна превышать величину $\sim 0,2$ м. При этих условиях временное разрешение измерительных каналов телескопа (1 - 2 нс в зависимости от амплитуды импульса) сопоставимо с временной неопределенностью, связанной с измерением расстояние до оптического модуля (1 нс).

Измерение координат оптических модулей и калибровочных источников света нейтринного телескопа осуществляется с помощью гидроакустической системы измерения координат, разработанной компанией EvoLogics специально для телескопа Baikal-GVD [109]. Система позиционирования представляет собой совокупность глубоководных электронно-акустических устройств (акустических модулей - АМ), расположенных на гирляндах телескопа и в реперных точках, относительно которых проводятся измерения. Точные географические координаты

реперных точек определяются при постановке системы геодезическими методами.

Функционально подводное оборудование делится на приемоизлучающие приборы и приемники ультразвуковых сигналов. В акустических модемах EvoLogics эти функции совмещены: каждый модем может выполнять функции как излучателя, так и приемника излучения. Внешний вид акустического модема показан на рисунке 5.2.8. Он состоит из блока электроники, размещенного в металлическом корпусе, и гидрофона.



Рис. 5.2.8. Внешний вид акустического модема.

На каждой гирлянде телескопа размещено 4 АМ (см. рисунок 5.1.3). Один модем располагается около якоря гирлянды в реперной точке. Поскольку его координаты не меняются со временем, он выполняет функции излучателя ультразвуковых сигналов. Три модема располагаются на уровнях 181 м, 346 м и 538 м от дна оз. Байкал и предназначены для определения координат оптических модулей гирлянды. На рисунке 5.2.9 представлены результаты измерения положений акустических модемов для разных расстояний от дна оз. Байкал.

Измерения проводились каждые 40 секунд на протяжении всего времени работы установки. Как видно из рисунка, максимальный разброс положений АМ увеличивается с ~ 1 м (для нижних АМ гирлянды) до ~ 10 м для верхних модемов. Следует отметить, что перемещение модулей происходит практически одинаково на разных гирляндах одного кластера. В левой части рисунка 5.2.10 в качестве примера показаны отклонения верхних модулей двух соседних гирлянд от исходного положения X_0 в течение суточной серии измерений.

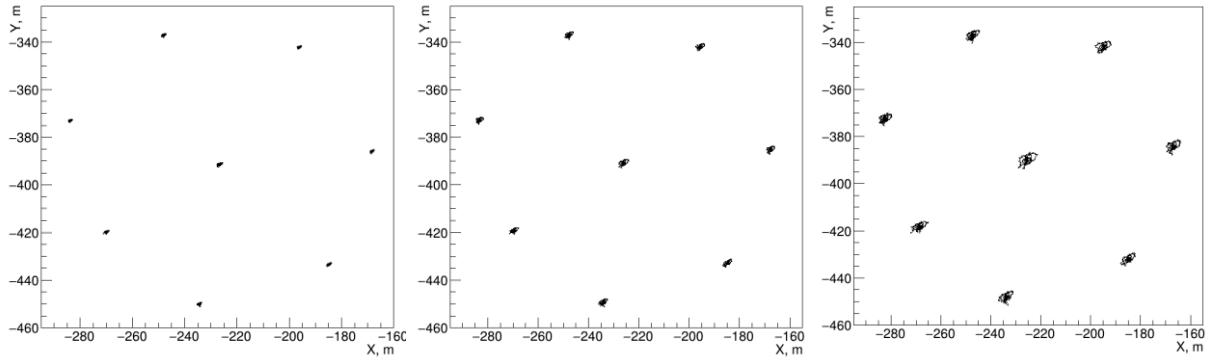


Рис. 5.2.9. Результаты измерения положения акустических модемов, установленных на гирляндах второго кластера Baikal-GVD на расстояниях от дна озера 181 м (слева), 346 м (в центре) и 538 м (справа) с 15 апреля по 15 июня 2017 года.

Точность восстановления координат оптических модулей акустической системой позиционирования определяется тремя факторами: точностью измерения координат акустических модемов, смещением ОМ за временной интервал между измерениями и ошибкой аппроксимации координат оптических модулей по координатам АМ. Точность измерения координат АМ была измерено независимо и составила единицы сантиметров. Смещение ОМ можно оценить по результатам измерения смещений АМ. На рисунке 5.2.10 представлены распределения по скоростям перемещения акустических модемов для разных расстояний от дна озера. В области максимальных скоростей перемещение за время между измерениями в 40 секунд смещение АМ составляет ~ 10 см, что соответствует временной неопределенности меньше 1 нс. Точность измерения скорости перемещения АМ характеризуется распределением по скоростям перемещения неподвижного акустического модема, установленного на якоре гирлянды.

Для точной аппроксимации координат ОМ по координатам акустических модемов нужно знать форму изгиба гирлянды. Исследования формы гирлянды с использованием калибровочных источников света в настоящее время не завершены, и для восстановления положения ОМ используется линейная аппроксимация по координатам ближайших АМ.

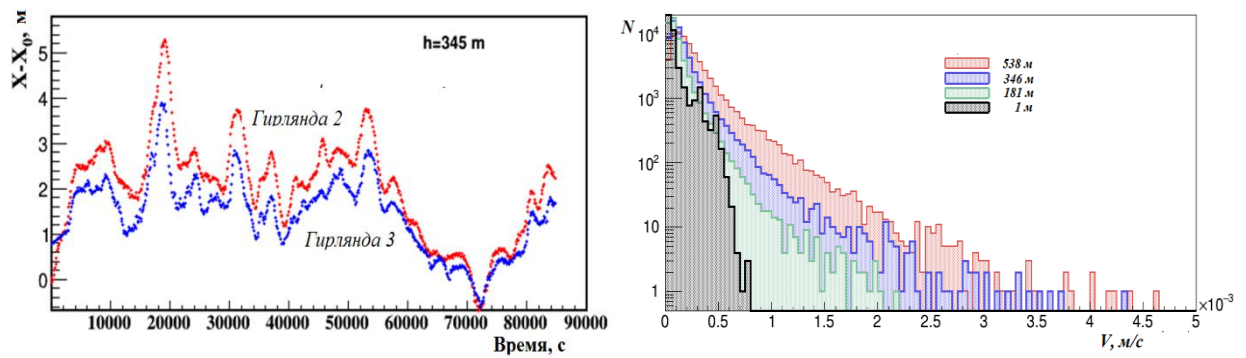


Рис. 5.2.10. Отклонения верхних модулей двух соседних гирлянд от исходного положения X_0 в течение суточной серии измерений (слева), распределения по скоростям перемещения АМ, расположенных на разных расстояниях от дна озера (справа).

Лазерные калибровочные источники света

Для комплексной проверки установки во всех режимах ее функционирования использовались два лазерных калибровочных источника света. Они позволили проверить корректность калибровочных процедур, работу гидроакустической системы позиционирования, методику реконструкции событий, регистрируемых нейтринным телескопом.

Первый лазерный источник света был разработан для установки НТ200. Длина волны лазера составляла 480 нм. Он позволял генерировать пять серий световых сигналов с интенсивностью от 10^{12} до 6×10^{13} фотонов/импульс, что примерно соответствует энергиям каскадных ливней от 10 ПэВ до 600 ПэВ. При помощи этого лазерного источника в 2014 году были проведены исследования методики реконструкции параметров каскадных ливней. Положение лазера было восстановлено на основании данных о времени регистрации лазерных импульсов массивом оптических модулей, расположенных на 5 гирляндах. Измерительные каналы гирлянд были прокалиброваны при помощи светодиодных источников света. Результаты реконструкции сопоставлялись с координатами лазера, полученными из данных акустической системы позиционирования. Распределение по разнице между восстановленными r_{rec} и измеренными r_{las} координатами лазера

представлено в левой части рисунка 5.2.11. Точность восстановления (медианное значение) составило около 3 м. Расположение лазера, гирлянд оптических модулей и распределение реконструированных координат лазера в горизонтальной плоскости показано в правой части рисунка. Полученные результаты соответствуют ожидаемой точности реконструкции каскадных ливней.

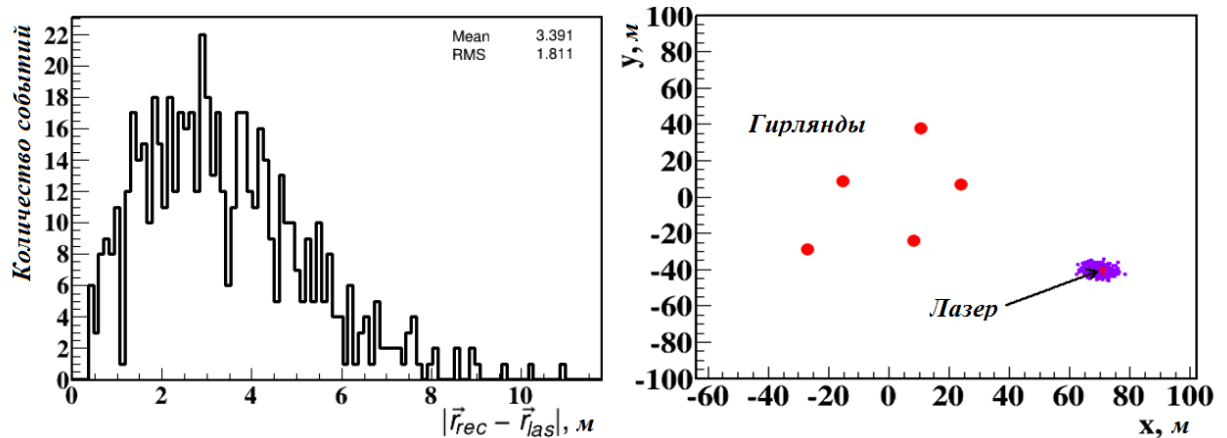


Рис. 5.2.11. Распределение по разнице между восстановленными r_{rec} и измеренными r_{las} координатами лазера (слева) и результаты реконструкции положения лазера в горизонтальной плоскости (справа).

В дальнейшем проведение исследований с первым лазером стало невозможным из-за выхода из строя его несущей конструкции. В 2015 году были начаты работы по изготовлению нового лазера для установки Baikal-GVD, и в 2017 году лазер был установлен в оз. Байкал между двумя кластерами (см. рисунок 5.1.4). Новый лазерный источник излучает на длине волны 532 нм. Энергия в импульсе достигает величины 0.37 мДж ($\sim 10^{15}$ фотонов) при длительности вспышки ~ 1 нс. Для регулировки интенсивности излучения лазера предусмотрено 36 уровней ослабления сигнала с шагом в 3 дБ. Лазер установлен на уровне, равном глубине расположения центральных модулей нижних секций гирлянд и снабжен изотропным рассеивателем света. На рисунке 5.2.12 представлен пример регистрации лазерной вспышки первым кластером Baikal-GVD. В левой части рисунка представлен общий вид события. Лазерная вспышка надежно регистрируется

всеми каналами нижних и средних секций гирлянд. Цвет показывает время регистрации лазерного сигнала измерительными каналами, размер окружности пропорционален логарифму заряда зарегистрированного сигнала.

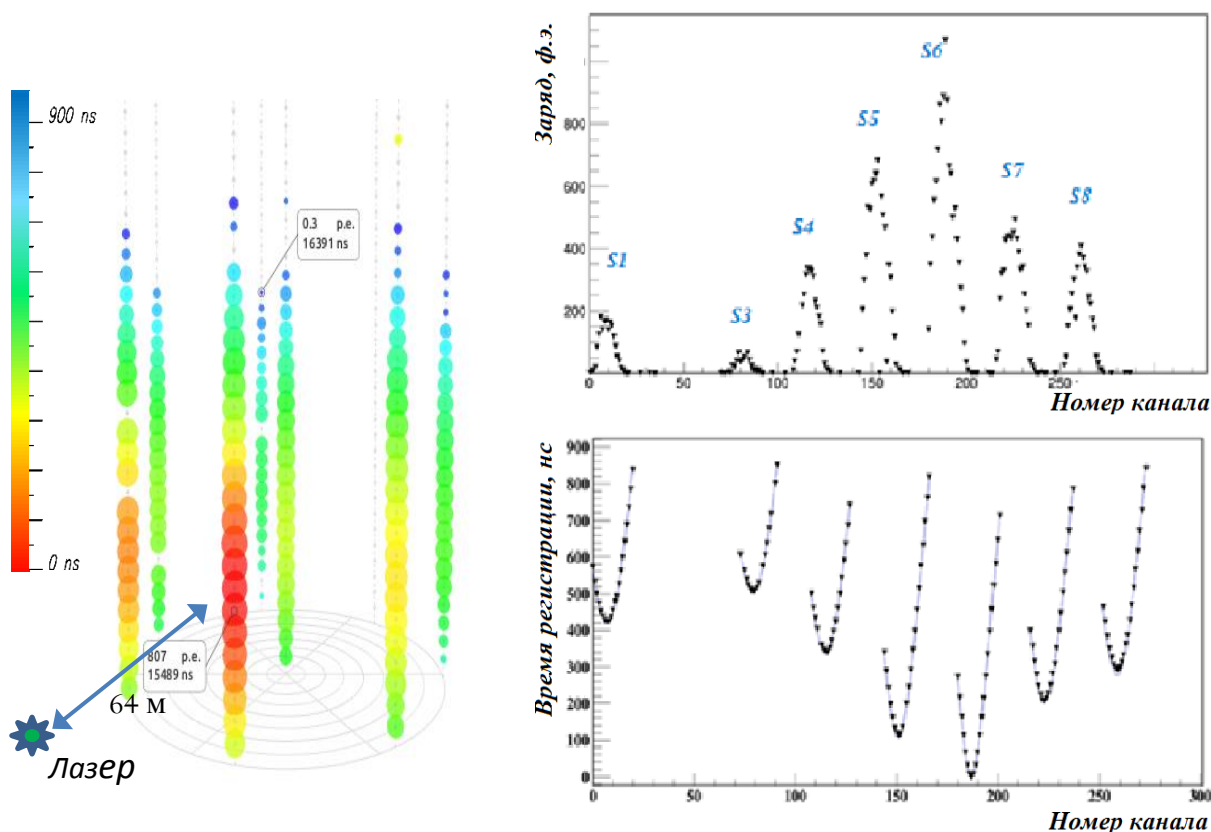


Рис. 5.2.12. Пример регистрации лазерного импульса.

В правой части рисунка 5.2.12 представлены заряды и время регистрации сигналов для всех измерительных каналов. Нумерация каналов начинается с нижнего оптического модуля первой гирлянды (S_1). На временном графике точки показывают время регистрации лазерной вспышки каналами установки (временная калибровка каналов была проведена независимым методом по светодиодным калибровочным источникам). Сплошная линия показывает ожидаемое время распространения света от лазерного источника до гирлянд, на которых расположены оптические модули (координаты лазера и оптических модулей получены из данных акустической системы позиционирования). Согласие ожидаемых и

измеренных значений времен регистрации указывает на корректность временной калибровки каналов и достаточно высокую точность определения координат оптических модулей и лазера.

5.3. Регистрация мюонов и каскадных ливней

Регистрация нейтринных событий в телескопе осуществляется по продуктам их взаимодействия - мюонам и каскадным ливням. Мюоны образуются в результате взаимодействия мюонных нейтрино с нуклонами по каналу заряженных токов, каскады генерируются во взаимодействиях нейтрино всех типов. Основными задачами, решаемыми при регистрации мюонов и каскадных ливней от нейтрино астрофизической природы, являются их выделение из фона атмосферных мюонов и нейтрино и реконструкция параметров этих событий: энергии, направления, точки взаимодействия. В данном параграфе представлены выборочные результаты, полученные при исследовании методов выделения и реконструкции событий и фоновых условий их регистрации.

Атмосферные мюоны и нейтрино

Атмосферные мюоны и нейтрино являются основным источником естественного фона при регистрации природных нейтринных потоков. Фоновые события, генерированные мюонами, можно разделить на три типа. К первому типу относятся группы мюонов. Они являются основным источником фона при регистрации каскадных ливней, образованных вне геометрического объема установки. Другим источником фона для каскадов являются взаимодействия атмосферных мюонов в рабочем объеме установки с образованием каскадных ливней. Третий тип фоновых событий – мюоны, приходящие из нижней полусферы, образовавшиеся в результате взаимодействия атмосферных нейтрино под установкой. На рисунке 5.3.1 представлены примеры этих трех типов событий, зарегистрированных в установке. Размер окружностей, показывающих сработавшие каналы,

пропорционален логарифму заряда, время регистрации характеризуется цветом: изменение цвета от красного до синего соответствует увеличению времени.

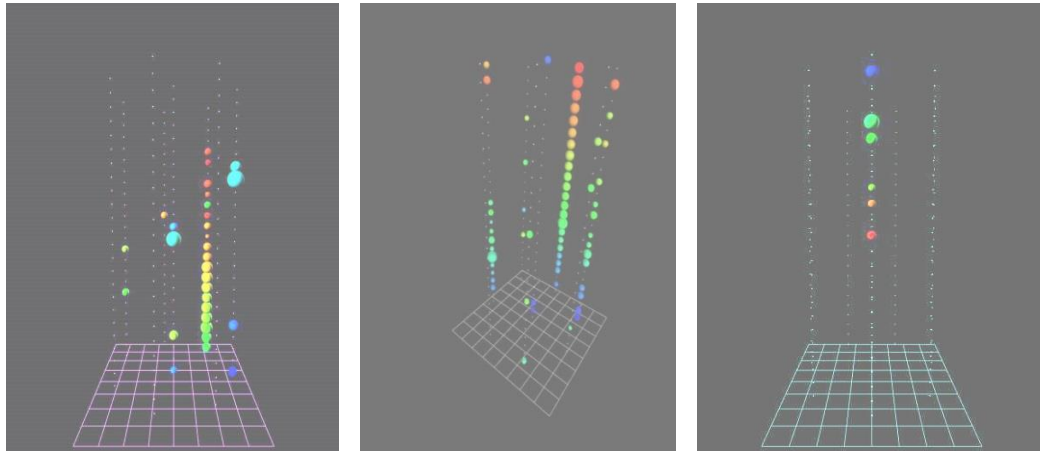


Рис. 5.3.1. Примеры мюонных событий: около-вертикальный мюон атмосферного происхождения (слева), группа мюонов (в центре), мюон из нижней полусферы (справа).

Времена срабатывания каналов для мюона из нижней полусферы показаны на рисунке 5.3.2. При выделении событий, соответствующих около-вертикальным мюонам из нижней полусферы, использовался критерий: $0,2 \text{ м/нс} < v_i = \frac{1}{n-1} \sum \frac{z_{ij}}{t_{ij}} < 0,4 \text{ м/нс}$, v_i – вертикальная составляющая средней скорости прохождения сигнала между i -ым ОМ и остальными сработавшими оптическими модулями (ось z направлена вверх).

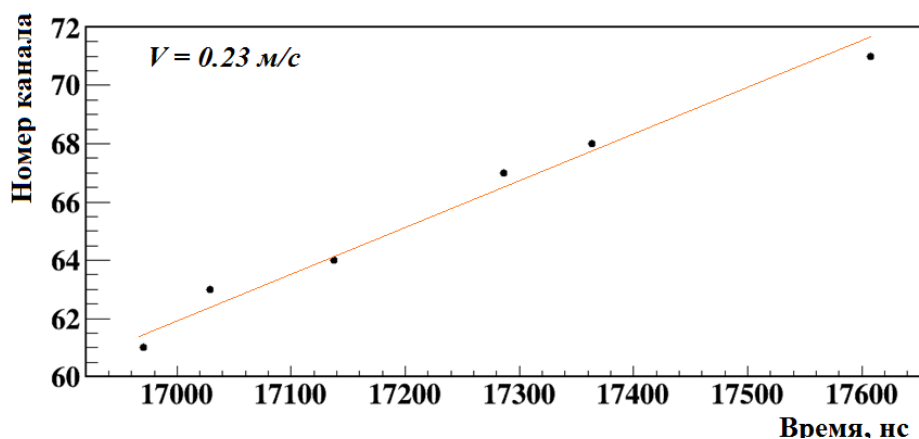


Рис. 5.3.2. Времена срабатывания каналов для около-вертикального мюона из нижней полусферы, представленного на рисунке 5.3.1.

Ожидаемый темп счета событий от атмосферных мюонов, удовлетворяющих триггерным условиям для установки GVD-1 (2304 оптических модуля), составляет 170 Гц. Для условий отбора, необходимых для восстановления геометрических параметров мюонов (условие 6/3 – срабатывание не менее 6-ти ОМ на трех гирляндах), расчетный темп счета составляет 11 Гц. Ожидаемый темп счета мюонов от атмосферных нейтрино из нижней полусферы составляет $\sim 4,3 \times 10^3$ событий в год.

Атмосферные мюоны могут быть использованы в качестве калибровочного источника для различных типов событий, в частности и для временной калибровки измерительных каналов (*мюонной калибровки*). *Мюонная калибровка* предназначена для определения временных задержек между соседними каналами (межканальных задержек). Для этого производится сравнение экспериментально измеренных распределений межканальных задержек ΔT_{μ} с ожидаемыми распределениями, полученными в результате моделирования потока атмосферных мюонов ΔT_{MC} .

Для моделирования потока атмосферных мюонов на уровне моря использовалась программа CORSIKA 5.7 (адронные взаимодействия разыгрывались по модели QGSJET). Распространение мюонов через воду и грунт, и распространение черенковского излучения в воде моделировались по специально разработанным для Байкальского эксперимента программам. Среднее число фотоэлектронов, рожденных на фотокатодах ФЭУ, рассчитывалось с учетом чувствительности оптических модулей и их ориентации относительно направления прихода фотонов. Время срабатывания фотодетекторов определялось с учетом временных параметров фотоэлектронных умножителей.

Для формирования экспериментальных ΔT_{μ} распределений использовались данные, полученные при штатных триггерных условиях работы установки (совпадения соседних каналов в секциях с порогами 1,5 ф.э. и 4 ф.э.). Для подавления шумовых срабатываний каналов применялся так называемый “принцип причинности”. Идея его заключается в

том, что из всех зарегистрированных сигналов выделяется группа импульсов, разница времен между которыми не противоречит возможности их генерации частицей, двигающейся со скоростью света. Все остальные импульсы считаются шумовыми и отбрасываются. Для формирования ΔT_μ распределений из выделенных импульсов отбирались сигналы, заряд которых превышал порог 2 ф.э. Кроме того требовалось, чтобы для каждого выделенного сигнала на соседних каналах присутствовали импульсы, удовлетворяющие *принципу причинности*. Для формирования ожидаемых распределений межканальных задержек ΔT_{MC} использовался банк данных моделированных событий. Отбор сигналов в моделированных событиях осуществлялся по тем же алгоритмам, как и для экспериментальных данных.

Из-за различия в длинах кабельных коммуникаций и задержках фотоэлектронных умножителей (эти параметры не учитываются при моделировании установки) экспериментальные и ожидаемые распределения межканальных задержек сдвинуты на величину T_0 . При подборе величины межканальной сдвигки T_0 требовалось, чтобы ΔT_μ и ΔT_{MC} максимально совпадали друг с другом (использовался критерий согласия χ^2). На рисунке 5.3.3 представлены примеры экспериментальных и моделированных распределений межканальных задержек после подбора оптимального значения величины межканальной сдвигки.

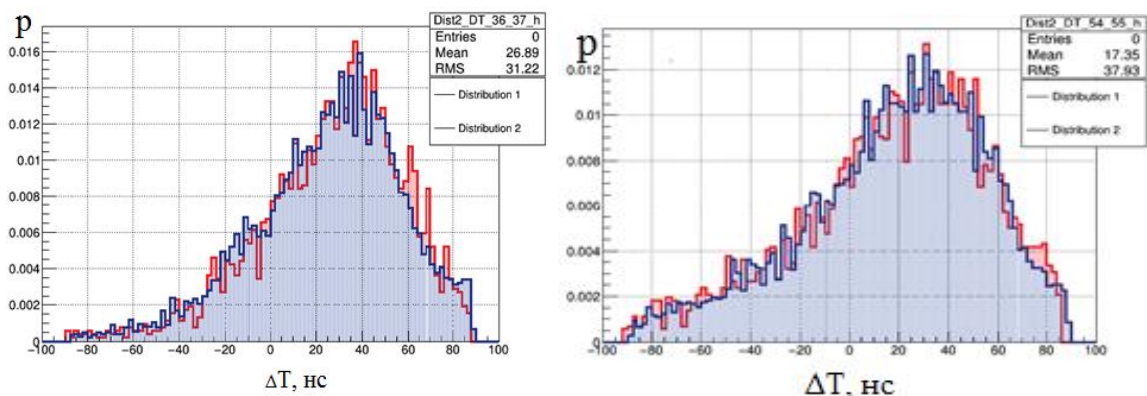


Рис. 5.3.3. Примеры экспериментальных (синий цвет) и моделированных (красный цвет) распределений межканальных задержек для мюонных данных 2015 года (каналы 36/37 слева и 54/55 справа).

Экспериментальные и моделированные распределения межканальных задержек хорошо согласуются друг с другом, что указывает на корректную работу установки в режиме регистрации мюонных событий.

Каскадные ливни

Одной из наиболее приоритетных задач анализа данных нейтринного телескопа является выделение и реконструкция каскадных ливней, генерированных в результате взаимодействия нейтрино высоких энергий в рабочем объеме детектора. Проверка методики выделения и реконструкции таких событий была проведена с использованием данных, полученных на первом кластере “Дубна” в 2015 году.

Реконструкции параметров ливней высокой энергии (направления, энергии и координат каскада) выполнялась в два этапа. На первом этапе, на основании информации о времени срабатывания каналов детектора определялись координаты максимума ливня. Ливень рассматривался как точечный источник света. Координаты ливня восстанавливались методом минимизации функции χ^2 :

$$\chi_t^2 = \frac{1}{(N_{hit}-4)} \sum_{i=1}^{N_{hit}} \frac{(T_i(\vec{r}_{sh}, t_0) - t_i)^2}{\sigma_{ti}^2}, \quad (5.3.1)$$

где t_i и T_i – измеренное и ожидаемое время регистрации сигнала от ливня, t_0 – время образования ливня, σ_0 – ошибка измерения времени, N_{hit} – количество сработавших каналов. Байкальская вода характеризуется большой длиной рассеяния (больше 30 метров), и основная часть фотоприемников детектора регистрирует прямые черенковские фотоны или фотоны, рассеянные на малые углы. Это позволяет использовать в качестве ожидаемого времени T_i время прохождения прямых фотонов от ливня до фотодетектора.

На втором этапе реконструкции восстанавливалась энергия и направление ливня. При этом использовались координаты каскада, полученные на первом этапе анализа. В качестве энергии ливня и его

полярного и азимутального углов E_{sh} , θ и φ выбирались параметры, полученные в результате минимизации следующего функционала:

$$L_A = - \sum_{i=1}^{N_{hit}} \ln p_i \left(A_i, E_{sh}, \vec{\Omega}_{sh}(\theta, \varphi) \right), \quad (5.3.2)$$

Функция $p_i(A_i, E_{sh}, \vec{\Omega}_{sh}(\theta, \varphi))$ представляет собой вероятность регистрации сигнала с амплитудой A_i , измеренной в фотоэлектронах, от ливня с энергией E_{sh} и направлением оси $\vec{\Omega}_{sh}$ i -ым сработавшим фотодетектором телескопа и имеют следующий вид:

$$p_i = \sum_{n=1}^{\infty} P(n/\bar{n}) \int_{A_i - \frac{\alpha}{2}}^{A_i + \frac{\alpha}{2}} \xi_i(A, n) dA, \quad (5.3.3)$$

где $P(n/\bar{n})$ – вероятность регистрации n фотоэлектронов при среднем значении \bar{n} для распределения Пуассона, $\xi_i(A, n)$ – плотность вероятности регистрации амплитуды A при уровне засветки в n фотоэлектронов, α – цена деления АЦП в фотоэлектронах. Среднее значение \bar{n} определялось в результате моделирования откликов оптических модулей телескопа на черенковское излучение ливня с энергией E_{sh} и направлением оси $\vec{\Omega}_{sh}$ с учетом распространения света в воде, относительного расположения и ориентации ОМ относительно ливня и чувствительности оптических модулей.

Поиск нейтрино высоких энергий в установке “Дубна” был основан на выделении каскадов, образованных в нейтринных взаимодействиях в области чувствительного объема телескопа. Методика выделения и реконструкции ливневых событий была исследована на основе результатов моделирования отклика установки. Было получено, что выделение нейтринных событий из фона атмосферных мюонов достигается при отборе по множественности сработавших каналов $N_{hit} > 20$ (после подавления шумовых срабатываний). При этих условиях отбора точность восстановления энергии ливня

составляет около 30%, точность восстановления направления около 4° (медианное значение).

На рисунке 5.3.4 представлена эффективная площадь для регистрации нейтрино. В правой части рисунка показано ожидаемое энергетическое распределение каскадов, регистрируемых в установке за год экспозиции, образованных нейтрино астрофизической природы. Расчеты проводились для двух вариантов нейтринных спектров с показателями E^{-2} и $E^{-2.46}$ [59, 110]. На рисунке также представлены результаты расчета фона от атмосферных нейтрино. Ожидаемое количество каскадов, образованных нейтрино астрофизической природы с энергией большей 10^2 ТэВ, составляет около 0,5 событий в год. Фон от атмосферных нейтрино при этих энергиях существенно подавлен ($\sim 0,1$ событие за год экспозиции).

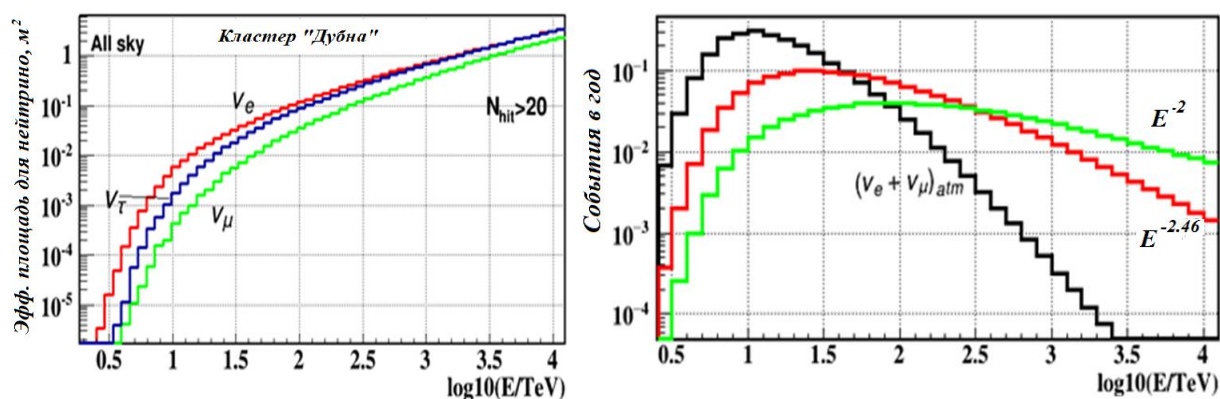


Рис. 5.3.4. Эффективная площадь для нейтрино разных типов (усреднение по всей небесной сфере с учетом эффекта поглощения нейтрино в Земле) и распределение по энергии ожидаемого количества нейтринных событий в кластере *Vaika-GVD* для двух вариантов спектра астрофизических нейтрино, полученных по данным *IceCube*, и для атмосферных нейтрино.

Для комплексной проверки методики выделения и реконструкции каскадов высоких энергий были использованы данные, полученные в период с 24 октября по 17 декабря 2015 года (41,6 дня живого времени экспозиции). За этот период времени была зарегистрировано $4,4 \times 10^8$ событий. Из полученных данных были отобраны события с множественностью срабатывания каналов $N_{hit} > 3$ (порог 1,5 ф.э.), удовлетворяющих критерию

причинности ($1,8 \times 10^7$ событий). После выполнения процедуры реконструкции положения, энергии и направления каскадов $1,3 \times 10^4$ событий были выделены как кандидаты на каскадные ливни. Распределение по множественности срабатывания каналов для выделенных событий и ожидаемый фон от атмосферных мюонов представлены в левой части рисунка 5.3.5. $1,2 \times 10^3$ событий были реконструированы как каскады с энергией больше 10^2 ТэВ. Распределение по множественности срабатывания каналов для этих событий показано в правой части рисунка 5.3.5. На рисунке также представлены ожидаемый фон от атмосферных мюонов и нейтрино и количество ожидаемых событий от нейтрино астрофизической природы со спектром $E^{-2.46}$. Экспериментальное распределение отобранных событий согласуется с ожидаемым фоном от атмосферных мюонов. Только одно событие ($N_{hit}=17$) существенно превышает ожидаемый фон. Анализ этого события с пониженными порогами (0,5 ф.э.) показывает, что 24 сработавших канала удовлетворяет “каскадной” гипотезе. Реконструированные параметры каскада: энергия 107 ТэВ, зенитный угол 59° , азимутальный угол 131° , расстояния от центра кластера 68 метров. Ограниченная статистика как экспериментальных, так и модельных данных в настоящее время не позволяет однозначно интерпретировать природу зарегистрированного события.

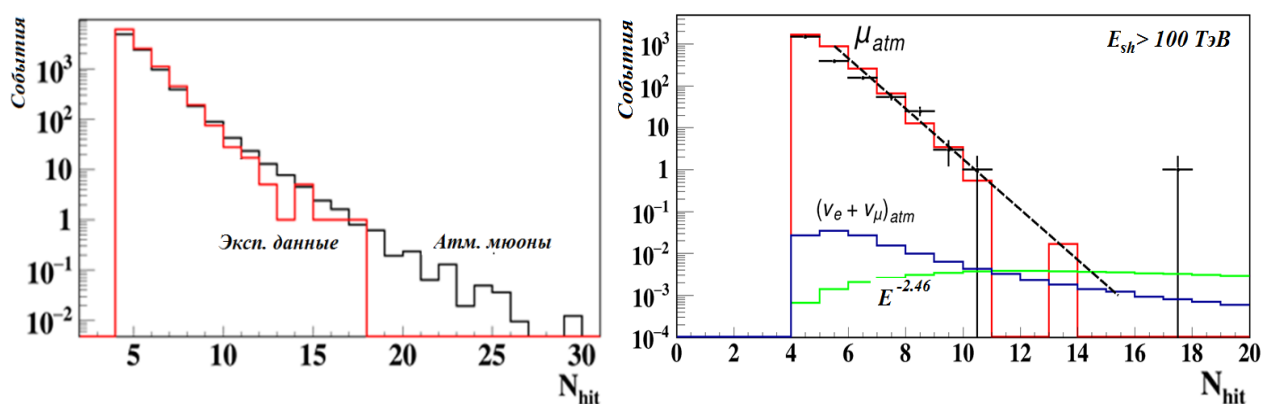


Рис. 5.3.5. Распределения по множественности срабатывания каналов для экспериментальных данных и ожидаемого фона атмосферных мюонов (слева) и для событий с реконструированной энергией > 100 ТэВ (справа).

Выводы к главе 5

В период с 2015 по 2017 годы в оз. Байкал была введена в эксплуатацию одна четвертая часть первой очереди нейтринного телескопа GVD-1 с эффективным объемом $\sim 0,1 \text{ км}^3$. На установке получен значительный объем информации, позволивший провести анализ корректности ее работы и надежности регистрирующей аппаратуры.

Первичный статистический анализ данных не выявил ошибок в работе аппаратуры детектора. Долговременный мониторинг состояния аппаратуры установки показал высокий уровень стабильности ее параметров.

Комплексная проверка установки в калибровочных режимах работы со светодиодными и лазерными источниками позволила экспериментально определить основные параметры установки: точность калибровки каналов и точность восстановления координат точечного источника света. Полученные значения неопределенностей $\sim 2 \text{ нс}$ для временной калибровки каналов и $\sim 3 \text{ м}$ для восстановленных координат источника света соответствуют ожидаемым значениям.

Анализ данных, полученных при регистрации мюонов и каскадных ливней (согласие экспериментальных и моделированных распределений по множественности срабатывания каналов для каскадов и временным сдвигам между каналами для мюонов) указывает на корректность набранного экспериментального материала и эффективность методики выделения и реконструкции каскадных ливней высокой энергии.

Заключение

Результаты работы можно кратко сформулировать в следующем виде:

1. Разработана общая концепция нейтринного телескопа Baikal-GVD, оптимизированная для условий развертывания детектора со льда оз. Байкал, обеспечивающая простоту его наращиваемости и возможность адаптации для решения различных физических задач. Поэтапное развёртывание детектора в виде отдельных кластеров позволило проводить физические исследования уже на ранних стадиях создания установки.
2. Разработана архитектуры системы сбора данных телескопа, обеспечивающая совместное эффективное функционирование ее основных элементов: триггерной системы, систем калибровки и мониторинга, электронных модулей обработки данных и передачи информации.
3. Разработан, создан и исследован в условиях долговременной работы в оз. Байкал комплекс физической аппаратуры, включающий в свой состав глубоководные модули и межмодульные коммуникации, обеспечивающие регистрацию сигналов, выработку триггера, формирование временных кадров событий, предварительную обработку и передачу информации в Береговой центр сбора данных, калибровку каналов установки, управление электропитанием всех узлов детектора.
4. На базе ФЭУ R7081-100 с повышенной квантовой чувствительностью фотокатода (~ 35 %) создан и исследован ключевой элемент системы регистрации нейтринного телескопа Baikal-GVD – глубоководный оптический модуль (ОМ). Характеристики ОМ удовлетворяют основным требованиям, предъявляемым к фотодетекторам крупномасштабных нейтринных телескопов: чувствительность к световому потоку на уровне единичных фотонов, динамический диапазон до $\sim 10^4$ ф.э, временное

разрешением на уровне единиц наносекунд, что соответствует угловому разрешению телескопа $\sim 0,5^\circ$.

5. Разработана методика, создано программное и аппаратное обеспечение и налажена процедура подготовки ОМ в условиях их массового производства. Проведены лабораторные испытания и паспортизация более 600 оптических модулей, которые в настоящее время входят в состав первых двух кластеров Baikal-GVD.
6. Разработана и экспериментально проверена методика калибровки измерительных систем телескопа, основанная на использовании светодиодных, лазерных и акустических источников сигналов. Точность временной калибровки каналов детектора составила 2 нс, точность восстановления координат каскадных ливней 2 - 3 м.
7. Годовые испытания первого полномасштабного кластера нейтринного телескопа продемонстрировали работоспособность и устойчивость работы системы регистрации и сбора данных установки в режимах калибровки и регистрации мюонов и каскадных ливней. Общий объем набранной статистики в 2016 году превысил $1,5 \times 10^9$ событий при живом времени экспозиции 235 дней.
8. Проведены долговременные натурные испытания надежности измерительных каналов установки: среднее время наработки на отказ составило $\sim 10^{-2} \frac{\text{отказов}}{\text{год}}$. Экспериментальная оценка надежности согласуется с расчетом.
9. В оз. Байкал смонтированы, налажены и введены в эксплуатацию в режиме постоянной экспозиции первые два кластера глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD с эффективным объемом для регистрации каскадных ливней 0,1 куб. км, представляющие собой одну из крупнейших установок Северного полушария.

10. Продемонстрирована возможность развертывания первой очереди установки GVD-1 с эффективным объемом $0,5 \text{ км}^3$ в течение 3 - 4 лет и доказана возможность длительной эксплуатации аппаратуры нейтринного телескопа.

Разработка и создание действующей конфигурации глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD результат совместной работы всего коллектива коллаборации “Байкал”. В заключение работы я хотел бы выразить благодарность моим коллегам, без которых выполнение данного исследования было бы невозможно: Г. В. Домогацкому, руководителю Байкальской коллаборации, за неоценимую поддержку и внимание на всех этапах работы, Ж.-А. М. Джилкибаеву и И. А. Белолоптикову, внесших основополагающий вклад как в теоретическое обоснование, так и в создание первых кластеров нейтринного телескопа.

Я искренне благодарен Н. А. Айрапетовой за постоянное внимание к работе, в значительной степени стимулировавшее ее своевременное завершение, А. В. Аврорину за плодотворные беседы и помощь в подготовке работы. Благодарю А. И. Панфилова, А. А. Дорошенко, М. Б. Миленина, силами которых была разработана конструкция базовых элементов и создана техническая база Байкальского нейтринного телескопа, А. П. Кошечкина за создание уникальной аппаратуры для управления электропитанием телескопа и за полезные советы и многочисленные критические замечания в ходе разработки электронных систем детектора, К. В. Конищева, многолетний вклад которого в организацию монтажа и развертывание телескопа трудно переоценить.

Я благодарен своим коллегам К. В. Голубкову, Д. А. Кулешову, А. А. Шейфлеру, Ф. К. Кошелю за их участие в разработке и основополагающий вклад в подготовку глубоководных модулей системы регистрации, управления и сбора данных телескопа первого кластера Baikal-GVD.

Выражаю признательность Б. А. Шайбонову и Е. Н. Плисковскому за подготовку программного обеспечения для анализа экспериментальных данных и для управления аппаратным комплексом детектора, за их многолетний постоянный контроль качества работы регистрирующей системы установки. Модернизация и развитие электроники телескопа в значительной степени проводились на основе анализа выявленных ими закономерностей в работе аппаратуры детектора. Также благодарю А. Д. Аврорина за анализ данных экспериментов, М. Д. Шелепова за выполненные им теоретические расчеты надежности электроники установки.

Благодарю сотрудников НИИЯФ МГУ Л. А. Кузмичева, идеи которого, заложенные в основу концепции системы сбора данных NT200+, явились основой для проектирования нейтринного телескопа Baikal-GVD, А. В. Скурихина и В. А. Кожина за разработку и создание блоков электроники для аппаратуры системы регистрации и сбора данных телескопа.

Я благодарен О. В. Суворовой и Э. А. Осиповой И. А. Данильченко за содействие в анализе полученных данных, обсуждение результатов исследований и дружеские советы.

Благодарю всех сотрудников сотрудничества Байкал за помощь и полезные замечания по ходу работы.

Список сокращений и условных обозначений

GVD – Gigaton Volume Detector, детектор с массой мишени миллиард тонн;

GNN – Global Neutrino Network, глобальная сеть нейтринных телескопов;

DSL – Digital Subscriber Line, цифровая абонентская линия;

SMA – коаксиальный радиочастотный разъем с резьбовым соединением;

ФЭУ – фотоэлектронный умножитель;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

БЦ – береговой центр сбора данных;

БИП – береговой источник питания;

БСД – блок сбора данных;

МГ – модуль управления гирляндой;

ОМ – оптический модуль;

ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема;

РУ – ретранслятор управления;

СКИ – светодиодный калибровочный источник;

ССД – система сбора данных;

ЦК – центр сбора данных кластера;

ЦМ – центральный модуль управления секции;

м.ф.э. – много-фотоэлектронный;

о.ф.с. – одно-фотоэлектронный спектр;

о.ф.э. – одно-фотоэлектронный;

ф.э. – фотоэлектрон;

эВ – электронвольт.

Список литературы

1. M.A. Markov /On high energy neutrino physics // Proc. of 10th ICHEP, Rochester (1960) p. 572.
2. I.A. Belolaptikov et al. (Baikal Coll.) /The Baikal underwater neutrino telescope: Design, performance, and first results // Astropart. Phys. V. 7 (1997) p. 263-282.
3. E. Andres et al. (AMANDA Coll.) /The AMANDA neutrino telescope: Principle of operation and first results // Astropart. Phys. V. 13 (2000) p. 1.
4. A. Achterberg et al. (IceCube Coll.) /First year performance of the IceCube neutrino telescope // Astropart. Phys. V. 26 (2006) p. 155.
5. A. Kappes for the KM3NeT Coll. /KM3NeT, A Next Generation Neutrino Telescope in the Mediterranean Sea // arXiv:0711.0563 [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/0711.0563>.
6. Ж.-А.М. Джилкибаев, Г.В. Домогацкий, О.В. Суворова. /Черенковские детекторы в нейтринной астрофизике высоких энергий // УФН, том 185 № 5 (2015) с. 531.
7. В.С. Березинский, Г.Т. Зацепин. /Возможности экспериментов с космическими нейтрино очень высоких энергий // Проект ДЮМАНД, УФН, том 122 № 1 (1977) с. 500.
8. U. Katz and Ch. Spiering. /High-Energy Neutrino Astrophysics: Status and Perspectives // Prog. Part. Nucl. Phys., V. 67 (2012) p. 651.
9. Y. Fukuda, T. Hayakawa, E. Ichihara et al. /Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos // Phys. Rev. Lett. V. 81 (1998) p. 1562.
10. P.-A. M. Dirac /Quantized singularities in the electromagnetic field // Proc. Roy. Soc. A133 (1931) p. 60.
11. И.М. Франк /Излучение Вавилова-Черенкова. Вопросы теории // Москва, Наука (1988) 224 стр.

12. Hooft G. /Magnetic monopoles in unified gauge theories // Nucl. Phys. B79 (1974) p. 276.
13. A.M. Polyakov /Particle spectrum in the quantum field theory // JETP Lett. 20 (1974) p. 194.
14. G.V. Domogatskij, I.M. Zheleznykh. Sov. J. Nucl. Phys. V.10 (1969) p. 702.
15. E.N. Parker /The Origin of Magnetic Fields // Astrophys. J. V.160 (1970) p. 383.
16. M.S. Turner et al. /Magnetic Monopoles and the Survival of Galactic Magnetic Fields // Phys. Rev. D26 (1982) p. 1296.
17. V.A. Rubakov /Superheavy Magnetic Monopoles and Proton Decay // JETP Lett. V.33 (1981) p. 644.
18. C.G. Callan, Phys. Rev. D26 (1982) p. 2058.
19. L.B. Bezrukov et al. Sov. J. Nucl. Phys. V.52 (1990) p. 86.
20. И. Е. Тамм, И. М. Франк. Доклады Академии Наук СССР, Т.14 (1937) с. 107.
21. И.Е. Тамм, И.М. Франк. /Когерентное излучение быстрого электрона в среде // УФН. Т. 93 (1967) с. 388.
22. A. Belyaev, I. Ivanenko, V. Makarov. Proc. of the 1978 DUMAND Summer Workshop, La Jolla, Calif. V.1 (1978) p. 337.
23. L.B. Bezrukov, A.V. Butkevich. /Simulation and Analysis Methods for Large Neutrino Telescop // Proc. of the Workshop, Zeuthen, Germany, July 6 - 9, 1998 (DESY-PROC-1999-01, Ed. Ch. Spiering) p. 265.
24. Беленький С. З. /Лавинные процессы в космических лучах // М.-Л.: Гостехиздат, (1948).
25. A.B. Migdal, Phys. Rev. V.103 (1956) p. 1811.
26. О.И. Довженко, А.А. Поманский, ЖЭТФ Т. 45 (1963) с. 268.
27. J. Alvarez-Muniz, E. Zas. /The LPM effect for EeV hadronic showers in ice: implications for radio detection of neutrinos // Phys. Lett B, V. 434 (1998) p. 396.
28. Ch.H.V. Wiebusch. /The Detection of Faint Light in Deep Underwater Neutrino Telescopes // PhD Thesis (Aachen: Physikalische Inst. RWTH, 1995).
29. Proc. 1976 DUMAND Summer Workshop. Ed. by A. Roberts. Honolulu, 1977.

30. P. Bosetti et al. (DUMAND Coll.) /DUMAND II: Proposal to construct a deep-ocean laboratory for the study of high energy neutrino astrophysics and particle physics // Tech. Rep. HDC-2-88, Hawaii DUMAND Center, University of Hawaii (1988).
31. I.A. Belolaptikov, L.B. Bezrukov, B.A. Borisovets et al. (Baikal Coll.) /The Baikal underwater neutrino telescope: design, performance, and first results // Astroparticle Physics. V. 7 #3 (1997) p. 263-282.
32. I. Sokalski et al. (Baikal Coll.) /The Baikal Neutrino Telescope NT-200 // Baikal Note 92-03. V. 3 (1992).
33. E. Andres et al. (AMANDA Coll.) /The AMANDA neutrino telescope: Principle of operation and first results // Astropart. Phys. V. 13 (2000) p. 1.
34. J. Ahrens et al. (AMANDA Coll.) Nucl. Instr. and Meth.in Phys. Res. A, V.524 (2004) p. 169.
35. E. Aslanides et al. (ANTARES Coll.) /A Deep Sea Telescope for High Energy Neutrinos // Proposal, astro-ph/9907432 (1999).
36. R. Triay et al. (ANTARES Coll.) /The ANTARES Optical Module // Nucl. Instr. and Meth.in Phys. Res. A, V. 484 (2002) p. 369-383.
37. E. G. Anassontzis et al. (NESTOR Coll.) /Status of NESTOR, a Deep Sea Neutrino Telescope in the Mediterranean // Nucl. Phys. Proc. Suppl. V. 66 (1998) p. 247-251.
38. L.K. Resvanis et al. (NESTOR Coll.) /NESTOR first results // Nuclear Physics B,. V. 138 (2005) p.187-190.
39. S. E. Tzamarias et al. (NESTOR Coll.) /NESTOR: A deep-sea neutrino telescope // Nucl. Instr. and Meth.in Phys. Res. A, V.502 (2003) p. 50-154.
40. G. Riccobene et al. (NEMO Coll.) /Deep seawater inherent optical properties in the Southern Ionian Sea // Astropart. Phys. V. 27 (2007) p. 1-9.
41. E. Leonora et al. (NEMO Coll.) Nucl. Instr. and Meth.in Phys. Res. A, V.725 (2013) p. 234.
42. U. Katz /A neutrino telescope deep in the Mediterranean Sea // Publication in

- the CERN Courier, V. 52 #6 (2012) p.31-33.
43. P. Bagley et al. (KM3NeT Coll.) 2008, Conceptual design report, ISBN 978-90-6488-031-5, [Электронный ресурс] Режим доступа: www.km3net.org.
 44. P. Bagley et al. (KM3NeT Coll.) 2010, Technical design report, ISBN 978-90-6488-033-9, [Электронный ресурс] Режим доступа: www.km3net.org.
 45. S. Adrián-Martínez et al. (KM3NeT Col.) /KM3NeT 2.0 – Letter of Intent for ARCA and ORCA // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. V. 43 (2016) 084001.
 46. E. Leonora et al. /The optical modules for the 8 towers of the KM3NeT-Italia project // Proceedings of the RICAP-14, Noto (Sicily, Italy) (2014).
 47. Giordano V., Aiello S., Leonora E. et al. / Study on 3-inch Photomultipliers // Proceedings of the RICAP-14, Noto (Sicily, Italy) (2014).
 48. V.M. Aynutdinov, V.V. Kindin, A.A. Petrukhinat et al. / Cherenkov neutrino telescope on the ground level // Nuclear Physics B, V. 70, Iss.1–3 (1999) p.489-491.
 49. White Rabbit [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.ohwr.org/projects/white-rabbit>.
 50. S. Adrián-Martínez et al. (KM3NeT Col.) /Deep sea tests of a prototype of the KM3NeT digital optical module // Eur. Phys. J. C, V. 74 (2014) p. 3056.
 51. S. Adrián-Martínez et al. (KM3NeT Col.) /The prototype detection unit of the KM3NeT detector // Eur. Phys. J. C, V. 76 (2016) p. 76-54.
 52. IceCube South Pole Neutrino Observatory [Электронный ресурс] Режим доступа <http://www.icecube.wisc.edu>.
 53. A. Achterberg et al. (IceCube Coll.) /First year performance of the IceCube neutrino telescope // Astropart. Phys. V. 26 (2006) p. 155.
 54. Klein S. for the IceCube Coll. /Recent vs from IceCube // arXiv:0810.0573.
 55. T. Anderson, K. Hanson, J.L. Kelley et al /Generation-2 IceCube Digital Optical Module and DAQ // Proceedings of the 34th International Cosmic Ray Conference, The Hague, The Netherlands, (2015) p.1148.
 56. L. Classen et al. / Multi-PMT Optical Modules for IceCube-Gen2 //

Proceedings of the 34th International Cosmic Ray Conference, The Hague, The Netherlands (2015) p. 1147.

57. L. Schutle, M. Voge, A. Hoffmann et al. /A large-area single photon sensor employing wavelength-shifting and lightguiding technology // Proceedings of the 33RD International Cosmic Ray Conference, Rio de Janeiro (2013).
58. S. Böser et al. /Wavelength-shifting Optical Module (WOM) // Proceedings of the MANTS Meeting, Geneva (2014).
59. M.G. Aartsen et al. (IceCube Coll.) /Observation of High-Energy Astrophysical Neutrinos in Three Years of IceCube Data // Phys. Rev. Lett. V. 113 (2014) p. 101101.
60. M.G. Aartsen et al. (IceCube Coll.) /Constraints on Ultrahigh-Energy Cosmic-Ray Sources from a Search for Neutrinos above 10 PeV with IceCube // Phys. Rev. Lett. V. 117 (2016) p. 241101.
61. R. Bagdjev, L. Bezrukov, B. Borisovets et al. /High-sensitive fast optical sensor QUASAR-370 for large-scale experiments in cosmic-ray physics // Известия РАН, сер. Физ., т. 57 №4 (1993) с. 135-137.
62. R. Bagdjev, V. Balkanov, I. Belolapnikov et al. / The optical module of the Baikal Deep Underwater Neutrino Telescope // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, V.420 (1999) p. 138-154.
63. А.В. Аврорин, В.М. Айнутдинов и др. /Поиск нейтрино от гамма-всплесков на Байкальском нейтринном телескопе НТ200 // Письма в Астрономический журнал: Астрономия и космическая астрофизика. Т. 37 №10 (2011) с. 754-760.
64. A.D. Avrorin, A.V Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /Search for neutrino emission from relic matter in the Sun with the Baikal NT200 detector//Astroparticle Physics. V. 62 (2015) p. 12-20.
65. A. Avrorin, V. Aynutdinov, V. Balkanov et al. /Search relativistic magnetic monopoles with the Baikal neutrino telescope //Astroparticle Physics V. 29 (2008) p. 366-372.

66. В.М. Айнутдинов, В.А. Балканов и др. /Поиск нейтрино высоких энергий в Байкальском глубоководном эксперименте // Известия РАН сер. Физ. Т. 69, №3 (2005) с. 410-412.
67. А.В. Аврорин, В.М. Айнутдинов и др. /Поиск нейтрино высоких энергий в Байкальском нейтринном эксперименте// Письма в Астрономический журнал: Астрономия и космическая астрофизика. Т. 35 №10 (2009) с. 723-735.
68. V.M. Aynutdinov, V.A. Balkanov, I.A. Belolaptikov et al. /The Baikal Neutrino Telescope // Physics of Atomic Nuclei V.69 #11 (2006) p. 1914-1921.
69. V. Aynutdinov, V. Balkanov, I. Belolaptikov et al /The BAIKAL neutrino experiment: From NT200 to NT200+ // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, V. 567 (2006) p. 433-437.
70. В.М. Айнутдинов, В.А. Балканов, И.А. Белолаптиков и др., /Байкальский нейтринный телескоп: статус, результаты и перспективы развития // Известия РАН, сер. Физ., т. 71, № 4, (2007) с. 597-601.
71. V.Aynutdinov, V. Balkanov, I. Belolaptikov et al. /The Baikal neutrino experiment: NT200+ and beyond // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, V.572 #1 (2007) p. 511-514.
72. V.Aynutdinov, V. Balkanov, I. Belolaptikov et al. /The BAIKAL neutrino experiment: status, selected physics results, and perspectives // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, V. 588, (2008) p. 99-106.
73. V.Aynutdinov, V. Balkanov, I. Belolaptikov et al. /The prototype string for the km³-scale Baikal neutrino telescope // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, V. 602 #1 (2009) p. 227-234.
74. A. Avrorin, V. Aynutdinov, V. Balkanov et al. /Baikal neutrino telescope - an underwater laboratory for astroparticle physics and environmental studies // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, V.598 #1 (2009) p. 282–288.
75. В.М. Айнутдинов, А.В. Аврорин и др. /Статус байкальского

- нейтринного эксперимента // Известия РАН, сер. Физ., т. 73. № 5 (2009) с. 682-684.
76. А.В. Аврорин, В.М. Айнутдинов, В.А. Балканов и др. /Байкальский нейтринный проект – история и перспективы // Известия высших учебных заведений. Физика. Т. 53 №6 (2010) с. 52-61.
77. HAMAMATSU LARGE PHOTOCATHODE AREA PHOTOMULTIPLIER TUBES [Электронный ресурс] Режим доступа:
http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/LARGE_AREA_PMT_TPMH1286E.pdf.
78. A. Avrorin, V. Aynutdinov, I. Belolaptikov et al. et al. /The Baikal neutrino experiment // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, V. 626 (2011) p. 13-18.
79. A. Avrorin, V. Aynutdinov, V. Balkanov et al. /The Baikal Neutrino Project: Present and perspective // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, V. 628 #1 (2011) p.115-119.
80. A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, I.A. Belolaptikov et al. /The Baikal neutrino telescope - Results and plans // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, V. 630 #1 (2011) p. 115-118.
81. A. Avrorin, V. Aynutdinov, I. Belolaptikov et al. /The Gigaton volume detector in lake Baikal // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, V. 639 #1 (2011) p. 30-32.
82. А.В. Аврорин, В.М. Айнутдинов, В.А. Балканов и др. /Статус байкальского нейтринного эксперимента // Известия РАН, сер. Физ., т. 75. № 3 (2011) с. 443-444.
83. TRACO POWER [Электронный ресурс] Режим доступа:
<https://www.tracopower.com/products/browse-by-category/find/tcl/3/>
84. MacArtney underwater technology [Электронный ресурс] Режим доступа:
<https://www.macartney.com/what-we-offer/systems-and-products/connectors/subconn/subconn-low-profile-series/>
85. А.В. Аврорин, В.М. Айнутдинов, И.А. Белолаптиков и др.
/Экспериментальная гирлянда Байкальского нейтринного телескопа

- HT1000 // Приборы и Техника Эксперимента, № 5 (2011) с. 55-65.
86. A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, I.A. Belolaptikov et al. /Status of the BAIKAL-GVD project // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, V. 692 (2012) p. 46-52.
87. Коллаборация “Байкал” /HT1000 – научно-технический проект глубоководного нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба на оз. Байкал // [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://baikalweb.jinr.ru>.
88. A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, I.A. Belolaptikov et al. /Present status of the BAIKAL-GVD project development // Journal of Physics: Conference Series. –V. 409 #1 (2013).
89. A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /The prototyping/early construction phase of the BAIKAL-GVD project // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, V. 742 (2014) p. 82-88.
90. A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, et al. /The optical module of Baikal-GVD // EPJ Web of Conferences, V. 116 (2016) p. 01003.
91. A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V. M. Aynutdinov et al. /The optical detection unit for Baikal-GVD neutrino telescope // EPJ Web of Conferences, V. 121 (2016) p. 05008.
92. А.В. Аврорин, А.Д. Аврорин, В.М. Айнутдинов, и др. /Оптический модуль Глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD // Письма в журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра». Т. 13, №. 6 (2016) с. 756–766.
93. Nautilus Marine Service [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.nautilus-gmbh.com/>
94. WACKER SilGel 612 A/B [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.tme.eu/gr/Document/02aaa20cff33d05c36474005a5e5916d/SILGEL%20612.pdf>
95. M.R. DeVries, J.N. DiGiacomo, ... S.J. Kapustinsky и др. // Nucl. Instrum. Meth. A. T. 241 (1985) p. 612–613.

96. А. Строганов /Оценка долговечности БИС по результатам ускоренных испытаний // Технологии в электронной промышленности №3 (2007) с. 90.
97. МОХА [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.moxa.ru/>
98. ООО “Сигранд” [Электронный ресурс] Режим доступа:
http://www.sigrand.ru/c/document_library/get_file?groupId=10226&uuid=464d26a4-7c8d-4a5c-a096-fe7e0145e2f1
99. NSGATE [Электронный ресурс] Режим доступа:
http://www.nsgate.ru/nsgate_qb307i.shtml
100. МОХА [Электронный ресурс] Режим доступа:
<https://www.moxa.ru/shop/ethernet/dsl/iex-402-shdsl/>
101. А.В. Аврорин, А.Д. Аврорин, Айнутдинов В.М. и др. /Система сбора данных Байкальского нейтринного телескопа НТ1000 // Приборы и Техника Эксперимента. № 3 (2014) с. 28-39.
102. V.M. Aynutdinov, R. Bannasch et al. /The data acquisition system for Baikal-GVD // EPJ Web of Conferences, V.116 (2016) p. 5004.
103. A.V. Avrorin, A.D. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /Status of the early construction phase of Baikal-GVD // Nuclear and Particle Physics Proceedings V. 273 (2016) p. 314-320.
104. A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /Baikal-GVD: Results, status and plans // The European Phys. J. Web of Conf., V. 116 (2016) p. 1005.
105. A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /Status and perspectives of the BAIKAL-GVD project // EPJ Web of Conferences, V. 121 (2016) p. 5003.
106. A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /Status of the Baikal-GVD Project: First Cluster Dubna // DOI: 10.1142/9789813224568_0025 Conference: C15-08-20, (2017) p. 160-163 Proceedings.
107. FIDES guide /Reliability Methodology for Electronic Systems // (2009), www.fides-reliability.org
108. М.Д. Шелепов / Исследование надежности аппаратуры Baikal-GVD // Магистерская диссертация, ИЯИ РАН, Москва 2016.

109. А.В. Аврорин, В.М. Айнутдинов, И.А. Белолаптиков и др.
/Гидроакустическая система позиционирования экспериментального кластера нейтринного телескопа масштаба кубического километра на озере Байкал // Приборы и техника эксперимента. Т. 4 (2013) с. 87-97.
110. G. Aartsen et al. (IceCube Collaboration) /Atmospheric and Astrophysical Neutrinos above 1 TeV Interacting in IceCube // Phys. Rev. D, V. 91, (2015) p. 022001, arXiv:1410.1749.

Список рисунков

№	Название рисунка	Стр.
1	<i>Рис. 1.1. Природные потоки нейтрино на уровне Земли: АЯГ - активные ядра галактик, ГЗК - область предельных энергий космических лучей согласно эффекту Грейзена-Зацепина-Кузьмина, ν - нейтрино.</i>	20
2	<i>Рис. 1.2.1. Суммарное по всем траекториям e^\pm угловое распределение черенковского излучения от электромагнитных ливней ($E_{sh} > 100$ ГэВ).</i>	32
3	<i>Рис. 1.3.1. Нейтринный телескоп AMANDA, фотография оптического модуля и вид скважины для разворачивания гирлянды.</i>	37
4	<i>Рис. 1.3.2. Нейтринный телескоп ANTARES. размещение гирлянд телескопа и фотография триплета оптических модулей установки.</i>	38
5	<i>Рис. 1.3.3. Контурная диаграмма тени луны, полученная по мюонам (слева) и пример углового распределение событий, зарегистрированных установкой ANTFRES за 167 дней живого времени работы установки. Красная и синяя кривые – результаты моделирования потока атмосферных мюонов и нейтрино, соответственно.</i>	39
6	<i>Рис. 1.3.4. Автономный прототип одного этажа установки NESTOR, поднятый на поверхность в апреле 2017 г.</i>	40
7	<i>Рис. 1.3.5. Расположение оптических модулей на одном “этаже” нейтринного телескопа NEMO (слева) и схема оптического модуля (справа).</i>	41
8	<i>Рис. 1.3.6. Оптический модуль установки KM3NeT (слева), гирлянда оптических модулей, установленная на донном якорю (в центре) и гирлянда, подготовленная для установки с плавучей платформы (справа).</i>	44
9	<i>Рис. 1.3.7. Общий вид нейтринного телескопа IceCube и схема оптического модуля установки.</i>	45
10	<i>Рис. 1.3.8. Распределения по выделенной энергии экспериментальных событий и ожидаемые распределения от атмосферных мюонов и нейтрино (слева) и направления прихода нейтринных событий с энергией больше 30 ТэВ на небесной сфере в галактических координатах (справа).</i>	47

11	<i>Рис. 1.4.1. Спектральная зависимость показателей поглощения (а) и рассеяния (б) байкальской воды, антарктического льда (AMANDA) и воды Средиземного моря (ANTARES).</i>	50
12	<i>Рис. 2.1.1. Место расположения Байкальской нейтринной обсерватории.</i>	56
13	<i>Рис. 2.1.2. Нейтринный телескоп NT200+.</i>	58
14	<i>Рис. 2.1.3. Функциональная схема центра коммутации NT200+.</i>	60
15	<i>Рис. 2.2.1. Соотношение эффективных чувствительностей ФЭУ R8055 и XP1807, измеренные в лаборатории (квадраты) и в оз. Байкал (окружности) и фотографии опытных образцов ОМ с ФЭУ разного типа.</i>	67
16	<i>Рис. 2.2.2. Примеры кадров событий, зарегистрированных на прототипе измерительного канала: шумовой импульс (слева), мюонное событие (в центре), импульс от калибровочного лазера (справа).</i>	68
17	<i>Рис. 2.2.3. Способы монтажа кабельных коммуникаций гирлянд: монтаж накладного кабеля на несущий трос (внешняя гирлянда NT200+) и использование несущего кабель-троса (экспериментальная гирлянда новой установки).</i>	69
18	<i>Рис. 2.2.4. Оптический модуль на основе ФЭУ R-7081HQE (версия 2010 года).</i>	70
19	<i>Рис. 2.2.5. Функциональная схема секции (версия 2010 года) и ее размещение на гирлянде. ЦМ – центральный модуль, СМ – сервисный модуль, ГАСИК – гидроакустическая система измерения координат.</i>	71
20	<i>Рис. 2.2.6. Блок-схема и размещение модулей экспериментальной гирлянды из двух секций по 6 ОМ: ЦМ – центральный модуль, СМ – сервисный модуль, РС – компьютерный модуль.</i>	74
21	<i>Рис. 2.2.7. Измеренные при помощи “сканирующего” АЦП задержки между сигналами на каналах экспериментальной гирлянды.</i>	76
22	<i>Рис. 2.2.8. Темп счета трех каналов экспериментальной гирлянды в течение двух месяцев экспозиции.</i>	79
23	<i>Рис. 2.2.9. Экспериментально измеренная (голубой кривая) и моделированная (красная кривая) зависимости скорости счета событий от зенитного угла.</i>	79
24	<i>Рис. 2.3.1. Базовая конфигурация нейтринного телескопа Baikal-GVD (первая очередь) и схема секции из 12 оптических модулей. Z, H, и R – параметры оптимизации.</i>	84

25	<i>Рис. 2.3.2. Зависимость эффективной площади Baikal-GVD от геометрических параметров установки для энергии мюонов 10 ТэВ (слева) и от энергии мюонов (справа).</i>	86
26	<i>Рис. 2.3.3. Зависимости эффективного объема регистрации от энергии ливней для разных значения расстояний между оптическими модулями Z, радиуса кластера R и расстояния между кластерами H.</i>	87
27	<i>Рис. 2.3.4. Схематическое изображение первой очереди нейтринного телескопа Baikal-GVD: вид сверху на телескоп (слева) и схема кластера установки (справа).</i>	88
28	<i>Рис. 2.3.5. Доля событий, в которых угол между заданным при моделировании и восстановленным направлением мюонов с энергией 10 ТэВ (слева) и каскадных ливней при усреднении по спектру E^{-2} (справа) меньше $\delta\theta$.</i>	89
29	<i>Рис. 2.3.6. Распределения по расстоянию δr между заданным и восстановленным центром тяжести ливня (слева) и энергетическое разрешение телескопа (справа), усреднение по спектру E^{-2}.</i>	89
30	<i>Рис. 2.3.7. Эффективная площадь нейтринного телескопа Baikal-GVD (2304 ОМ) для регистрации электронных нейтрино в разных интервалах зенитных углов.</i>	90
31	<i>Рис. 3.1.1. Оптический модуль Baikal-GVD.</i>	92
32	<i>Рис. 3.1.2. Фотография магнитного экрана - сетки из пермаллоя.</i>	93
33	<i>Рис. 3.1.3. Внешний вид ФЭУ HAMAMATSU R7081-100 и зависимость квантовой эффективности фотокатода от длины волны.</i>	95
34	<i>Рис. 3.1.4. Распределения фотоэлектронных умножителей по параметрам Q_{max} (слева) и HV (справа).</i>	96
35	<i>Рис. 3.1.5. Распределения фотоэлектронных умножителей по параметрам P/V (слева) и TTS (справа).</i>	96
36	<i>Рис. 3.1.6. Распределения фотоэлектронных умножителей по темновой скорости счета (Dark Counts).</i>	96
37	<i>Рис. 3.1.7. Блок электроники ОМ, установленный на цоколе ФЭУ.</i>	97
38	<i>Рис. 3.1.8. Блок-схема электроники ОМ.</i>	98
39	<i>Рис. 3.1.9. Плата делителя и усилителя сигналов ФЭУ.</i>	99
40	<i>Рис. 3.1.10. Схема делителя напряжений диодной системы ФЭУ.</i>	99
41	<i>Рис. 3.1.11. Схема усилителя сигналов ФЭУ.</i>	100
42	<i>Рис. 3.1.12. Фотография и электрическая схема светодиодного калибровочного источника оптического модуля.</i>	101

43	<i>Рис. 3.1.13. Внешний вид и функциональная схема контроллера ОМ.</i>	102
44	<i>Рис. 3.2.1. Осциллограмма входного и выходных сигналов усилителя оптического модуля.</i>	105
45	<i>Рис. 3.2.2. Типовые зависимости амплитуды (A) ширины (W) и заряда (Q) выходного сигнала усилителя от амплитуды входного сигнала.</i>	106
46	<i>Рис. 3.2.3. Формы выходных импульсов ОМ после прохождения через 90-метровый глубоководный кабель для сигналов с зарядами 1, 20, 50 и 10^3 ф.э.</i>	107
47	<i>Рис. 3.2.4. Распределение импульсов от калибровочных светодиодных источников ОМ по длительности переднего фронта ($T_{нф}$), заднего фронта ($T_{зф}$) и ширине импульсов на половине высоты ($T_{имп}$).</i>	108
48	<i>Рис. 3.2.5. Зависимость количества фотонов в импульсе светодиодного калибровочного источника от величины управляющего напряжения (слева) и величина перекрестных наводок между каналами двух светодиодов в зависимости от интенсивности их сечения.</i>	109
49	<i>Рис. 3.2.6. Характерное о.ф.э. зарядовое распределение при коэффициенте усиления ФЭУ $\sim 1 \times 10^7$ и распределение пьедестала (слева), распределение ОМ по величине о.ф.э. разрешения (справа).</i>	112
50	<i>Рис. 3.2.7. Зависимости коэффициентов усиления ОМ от величины напряжения на ФЭУ для одной партии ОМ (слева) и распределение ОМ по величине выбранного коэффициента усиления (справа).</i>	113
51	<i>Рис. 3.2.8. Типичный временной спектр ОМ (слева) и распределение ОМ по величине временного разрешения (справа).</i>	113
52	<i>Рис. 3.2.9. Усредненная градуировочная кривая каналов, измеренная для партии из 87 оптических модулей.</i>	115
53	<i>Рис. 3.2.10. Зависимость параметра Δt от количества ф.э. в импульсе и распределение ОМ по граничному значению $N_{фэ}$, для которого $\Delta t < 1$ нс.</i>	116
54	<i>Рис. 3.2.11. Характерная временная зависимость заряда послеимпульсов в 500 нс интервалах для о.ф.э. первичного импульса.</i>	117
55	<i>Рис. 3.2.12. Распределение ОМ по суммарному заряду послеимпульсов.</i>	117
56	<i>Рис. 3.2.13. Общий вид поворотного механизма с закрепленным на нем оптическим модулем.</i>	118
57	<i>Рис. 3.2.14. Угловая зависимость отклика ОМ.</i>	119

58	<i>Рис. 3.3.1. Схема поэтапной подготовки и испытаний ОМ.</i>	120
59	<i>Рис. 3.3.2. Монтажный стапель для монтажа ФЭУ и магнитного экрана.</i>	121
60	<i>Рис. 3.3.3. Характерный вид зависимости частоты отказов от времени.</i>	122
61	<i>Рис. 3.3.4. Выборочные результаты температурных испытания 10 блоков электроники ОМ: температура контроллера (слева) и величина высоковольтного напряжения (справа).</i>	124
62	<i>Рис. 4.1.1 Фотографии плат специализированной электроники, версия 2012 г</i>	128
63	<i>Рис. 4.1.2. Фотография и структурная схема 12-канального блока сбора данных и амплитудного анализа БСД-12.</i>	129
64	<i>Рис. 4.1.3. Фотография и функциональная схема платы управления ОМ.</i>	131
65	<i>Рис. 4.1.4. Внешний вид плат триггерной логики: плата триггера гирлянды (сверху) и кластера (снизу).</i>	132
66	<i>Рис. 4.2.1. Структурная схема измерительного канала установки.</i>	136
67	<i>Рис. 4.2.2. Функциональная схема канала платы аналогового преобразования сигналов и сбора данных.</i>	137
68	<i>Рис. 4.2.3. Графическое представление временного кадра канала.</i>	139
69	<i>Рис. 4.3.1. Структурная схема центрального модуля секции (слева) и схема размещения глубоководных модулей одной секции (справа).</i>	142
70	<i>Рис. 4.3.2. Коммутационная плата электропитания ЦМ.</i>	143
71	<i>Рис. 4.3.3. Крейт ЦМ с электроникой, установленный в глубоководный корпус.</i>	144
72	<i>Рис. 4.3.4. Функциональная схема системы формирования триггера и передачи данных платы БСД-12.</i>	146
73	<i>Рис. 4.3.5. Конфигурации матрицы совпадений для двух режимов формирования триггера: совпадение пар соседних каналов с низким и высоким порогами (слева) и совпадения каналов с низким порогом с заданной кратностью совпадений (справа).</i>	146
74	<i>Рис. 4.3.6. Примеры полезных сигналов (показаны красным цветом), выделенных из временных кадров каналов.</i>	148
75	<i>Рис. 4.3.7. Общий вид гирлянды Vaikal-GVD и функциональная схема коммутационного модуля гирлянды.</i>	149
76	<i>Рис. 4.3.8. Коммутационный модуль гирлянды в глубоководном корпусе.</i>	150

77	<i>Рис. 4.3.9. Функциональная схема электроники центра сбора данных кластера.</i>	151
78	<i>Рис. 4.3.10. Внешний вид и блок-схема оптического наконечника.</i>	152
79	<i>Рис. 4.3.11. Функциональная схема системы электропитания кластера.</i>	154
80	<i>Рис. 4.3.12. Функциональная схема коммутатора электропитания.</i>	155
81	<i>Рис. 5.1.1. Конфигурации установки 2012 – 2014 годов.</i>	158
82	<i>Рис. 5.1.2. Конфигурация кластера “Дубна” и количество событий, зарегистрированных в период с апреля 2015 по март 2016.</i>	159
83	<i>Рис. 5.1.3. Общий вид гирлянды с тремя секциями ОМ (слева), конфигурация кластера 2016 (в центре) и статистика набора экспериментальных данных.</i>	161
84	<i>Рис. 5.1.4. Конфигурация первой очереди GVD-1, схема размещения первых двух кластеров нейтринного телескопа и статистика набора данных в период с апреля по июнь 2017 года.</i>	162
85	<i>Рис. 5.1.5. Примеры распределений временных интервалов между событиями. Сплошная линия – аппроксимация экспонентой.</i>	164
86	<i>Рис. 5.1.6. Распределение по количеству событий, зарегистрированных за фиксированные интервалы времени (0.31 сек) в серии измерений Run #340 (сплошная линия – распределение Пуассона).</i>	164
87	<i>Рис. 5.1.7. Пример распределения событий по параметру Δt (см. текст).</i>	165
88	<i>Рис. 5.1.8. Данные годового мониторинга параметров ОМ: напряжения электропитания (слева сверху), температура контроллера (справа сверху), высоковольтного напряжения на ФЭУ (слева внизу) и темпа счета шумов каналов (справа внизу).</i>	167
89	<i>Рис. 5.2.1. Пример калибровочного о.ф.э. спектра ФЭУ R7081-100.</i>	172
90	<i>Рис. 5.2.2. Распределение каналов по величине коэффициента усиления G.</i>	173
91	<i>Рис. 5.2.3. Два метода временной калибровки: измерение задержки сигнала ФЭУ относительно тестового импульса (слева) и измерение задержки между импульсами на соседних каналах (справа).</i>	175
92	<i>Рис. 5.2.4. Распределения по разности задержек между соседними каналами, измеренные с помощью тестового импульса dT_{TST} и с помощью светодиодного источника dT_{LED}.</i>	176

93	<i>Рис. 5.2.5. Распределение по разности между задержками каналов, полученными при помощи светодиодной калибровки (dT_{LED}) и с использованием тестового импульса (dT_{TST}) для выборочных каналов кластера 2015 года (слева) и всех каналов кластера 2016 года (справа).</i>	176
94	<i>Рис. 5.2.6. Временные задержки каналов в зависимости от напряжения на делителе ФЭУ.</i>	177
95	<i>Рис. 5.2.7 (а). Временная калибровка секций при помощи матрицы светодиодов.</i>	178
96	<i>Рис. 5.2.7 (б). Измеренные $(T-T_0)_{185}$ и рассчитанные $(T-T_0)_{exp}$ временные задержки между каналами, расположенными на разных гирляндах (слева) и величина временной сдвигки между секциями, измеренная по разным парам каналов (справа).</i>	178
97	<i>Рис. 5.2.8. Внешний вид акустического модема.</i>	180
98	<i>Рис. 5.2.9. Результаты измерения положения акустических модемов, установленных на гирляндах второго кластера Baikal-GVD на расстояниях от дна озера 181 м (слева), 346 м (в центре) и 538 м (справа) с 15 апреля по 15 июня 2017 года.</i>	181
99	<i>Рис. 5.2.10. Отклонения верхних модулей двух соседних гирлянд от исходного положения X_0 в течение суточной серии измерений (слева), распределения по скоростям перемещения АМ, расположенных на разных расстояниях от дна озера (справа).</i>	182
100	<i>Рис. 5.2.11. Распределение по разнице между восстановленными r_{rec} и измеренными r_{las} координатами лазера (слева) и результаты реконструкции положения лазера в горизонтальной плоскости (справа).</i>	183
101	<i>Рис. 5.2.12. Пример регистрации лазерного импульса.</i>	184
102	<i>Рис. 5.3.1. Примеры мюонных событий: около-вертикальный мюон атмосферного происхождения (слева), группа мюонов (в центре), мюон из нижней полусферы (справа).</i>	186
103	<i>Рис. 5.3.2. Времена срабатывания каналов для около-вертикального мюона из нижней полусферы, представленного на рисунке 5.3.1.</i>	186
104	<i>Рис. 5.3.3. Примеры экспериментальных (синий цвет) и моделированных (красный цвет) распределений межканальных задержек для мюонных данных 2015 года (каналы 36/37 слева и 54/55 справа).</i>	188

- 105 *Рис. 5.3.4. Эффективная площадь для нейтрино разных типов (усреднение по всей небесной сфере с учетом эффекта поглощения нейтрино в Земле) и распределение по энергии ожидаемого количества нейтринных событий в кластере Baïka-GVD для двух вариантов спектра астрофизических нейтрино, полученных по данным IceCube, и для атмосферных нейтрино.* 191
- 106 *Рис. 5.3.5. Распределения по множественности срабатывания каналов для экспериментальных данных и ожидаемого фона атмосферных мюонов (слева) и для событий с реконструированной энергией $>100\text{ТэВ}$ (справа).* 192

Список таблиц

№	Название таблицы	Стр.
1	<i>Таблица 1.4.1. Характеристики среды в местах размещения нейтринных телескопов</i>	52
2	<i>Таблица 2.2.1. Временная калибровка каналов гирлянды лазерным источником света</i>	78
3	<i>Таблица 3.1.1. Спецификация ФЭУ R7081-100 [77]</i>	94
4	<i>Таблица 3.1.2. Основные параметры ОМ Baikal-GVD</i>	103
5	<i>Таблица 4.1.1. Коммерческая аппаратура, используемая в ССД установки</i>	134
6	<i>Таблица 4.2.1. Основные характеристики измерительного канала</i>	141
7	<i>Таблица 5.1.1. Конфигурации установки Baikal-GVD</i>	158
8	<i>Таблица 5.1.2. Статистика работы двух кластеров в период с 13 апреля по 15 июня 2017 года</i>	163
9	<i>Таблица 5.1.3. Среднеквадратичные отклонения распределений разности временных интервалов между последовательными мастерными записями</i>	166
10	<i>Таблица 5.1.4. Данные о работе измерительных каналов с 2012 по 2015 гг.</i>	170
11	<i>Таблица 5.2.1. Усредненные коэффициенты усиления каналов, полученные по данным 2014 года</i>	174