

*На правах рукописи*

Кулешов  
Денис Александрович

Система сбора данных глубоководного  
нейтринного телескопа NT1000

Специальность 01.04.01 — приборы и методы  
экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

МОСКВА — 2014

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

**Научный руководитель:**

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник лаборатории НАВЭ ИЯИ РАН,  
*Айнутдинов Владимир Маратович.*

**Официальные оппоненты:**

*Егоров Вячеслав Георгиевич*, доктор физико-математических наук,  
начальник сектора № 2 Лаборатории Ядерных Проблем  
Объединенного института ядерных исследований, (г. Дубна).  
*Чернов Дмитрий Валентинович*, кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник Научно-исследовательского института  
ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного  
университета имени М.В. Ломоносова, (г. Москва).

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение Государственный научный центр Российской Федерации – Институт физики высоких энергий.

Защита состоится \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ часов  
на заседании диссертационного совета Д 002.119.01  
на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института ядерных исследований Российской академии наук по адресу:  
117312, Москва, проспект 60-летия Октября 7А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН  
и на сайте <http://www.inr.ru/>

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Ученый секретарь  
диссертационного Совета  
доктор физико-математических наук

С. В. Троицкий

# Общая характеристика работы

## Актуальность работы

Крупномасштабные глубоководные/подледные черенковские детекторы элементарных частиц – нейтринные телескопы, создаваемые в первую очередь для решения задач астрофизики и космологии, являются также мощным инструментом исследования проблем, возникших на современном этапе развития физики элементарных частиц. Нейтринные телескопы позволяют исследовать свойства нейтрино в экспериментах по регистрации атмосферных нейтрино и нейтрино от ускорителей, осуществлять поиск частиц темной материи, исследовать потоки нейтрино астрофизической природы. До недавнего времени, уровень знаний о природных потоках нейтрино высоких и сверхвысоких энергией, в основном, определялся результатами, полученными в экспериментах на нейтринных черенковских детекторах NT200/NT200+ и AMANDA, а также на нейтринном телескопе ANTARES в Средиземном море. Эти три детектора относятся к первому поколению нейтринных телескопов с характерным эффективным объемом регистрации вторичных мюонов и ливней порядка  $10^7 \text{ м}^3$  по отношению к регистрации нейтрино с энергией выше 10 ТэВ. Результаты, полученные в экспериментах на нейтринных телескопах первого поколения, мотивировали разработку и создание нейтринных телескопов с эффективным объёмом масштаба кубического километра, которые позволят увеличить чувствительность детекторов к природным потокам нейтрино более чем на порядок.

В настоящее время в мире активно развиваются три проекта крупномасштабных нейтринных телескопов следующего поколения в естественных средах: IceCube на Южном полюсе, KM3NeT в Средиземном море и NT1000 на оз. Байкал, которые находятся на разных стадиях разработки и реализации. Конфигурация, архитектура системы сбора и передачи данных, а также потенциальные возможности при решении конкретных задач каждого из этих детекторов обусловлены их местоположением, свойствами среды, степенью сложности инженерно-технических решений при создании и эксплуатации установки, затратами на создание и поддержку инфраструктуры, а также возможностью модификации и увеличения светосилы телескопа.

Байкальский телескоп NT1000 и средиземноморский KM3NeT, расположенные в северном полушарии, а также детектор IceCube на Южном полюсе, в силу их географического местоположения, будут взаимно дополнять

друг друга в исследованиях природных потоков нейтрино по всей небесной сфере. Потребность как минимум в двух телескопах, расположенных в южном и северном полушариях, обусловлена их ограниченной угловой апертурой для широкой области энергий нейтрино. В области энергий ниже ПэВ, в силу высокого уровня фоновых событий от атмосферных мюонов, выделение нейтринных событий возможно лишь для нейтрино из-под горизонта. В области энергий выше ПэВ фон от атмосферных мюонов становится приемлемым для регистрации нейтрино сверху, однако, для нейтрино таких энергий Земля становится непрозрачной и апертура телескопа оказывается ограниченной для событий снизу. Детекторы, расположенные в северном полушарии, обладают важным преимуществом – они способны вести практически непрерывное наблюдение центра Галактики (НТ1000 – 18 часов и КМЗNeT – 15 часов в сутки) 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.

## **Цель работы**

Целью диссертационной работы является разработка, аппаратная реализация и долговременные испытания системы сбора данных нейтринного телескопа НТ1000.

## **Научная новизна и практическая ценность работы**

Созданная система сбора данных предназначена для работы в составе глубоководного нейтринного телескопа на оз. Байкал, принципиально нового детектора, как с точки зрения его масштабов, так и возможностей решения физических задач в области астрофизики и космологии. Разработанная система является первым опытом реализации в распределенных глубоководных физических установках экономичных линий связи на основе xDSL технологий, обеспечивающих скорость обмена данными около 10 Мбит/с при длине линий 1.2 км. Сочетание разработанных линий связи с новой методикой фильтрации событий подводной системой обработки данных представляет собой новый подход к организации системы передачи данных крупномасштабных нейтринных телескопов.

Ввод в эксплуатацию первого кластера НТ1000 из пяти гирлянд является определяющим шагом на пути к созданию детектора нового поколения: кубокилометрового нейтринного телескопа на оз. Байкал. В созданной

системе сбора данных заложена возможность ее расширения до масштабов кубокилометрового нейтринного телескопа на оз. Байкал.

Методики аппаратной и программной реализации сбора данных, отбора и фильтрации событий, контроля аппаратуры и калибровки могут быть использованы в детекторах с пространственно разнесённой решёткой регистрирующих элементов (в том числе в нейтринных телескопах).

### **Личный вклад автора**

1. Автором разработана архитектура системы управления, мониторинга и сбора данных нейтринного телескопа НТ1000.
2. Определено функциональное назначение, оптимизирован состав и сформулированы технические требования для электронных узлов (как блоков, разработанных участниками проекта, так и стандартной индустриальной сетевой аппаратуры) на базе которых осуществлено построение системы сбора данных.
3. Автором были собраны и подготовлены к установке в оз. Байкал глубоководные модули системы сбора данных экспериментальных гирлянд в 2010-2011 годах и первого кластера НТ1000 2012-2014 гг.
4. Проверена в реальных условиях эксплуатации на оз. Байкал аппаратура, обеспечивающая управление работой, сбор данных и контроль состояния нейтринного телескопа НТ1000.
5. На протяжении последних семи лет автор принимал непосредственное участие в развертывании установок на оз. Байкал и дежурил на нейтринном телескопе во время проведения долговременных серий измерений.

### **Автор защищает**

1. Архитектуру систем управления, мониторинга и сбора данных НТ1000.
2. Аппаратурный комплекс глубоководных модулей системы сбора данных НТ1000.
3. Результаты испытаний системы сбора данных в оз. Байкал на первом кластере НТ1000 2013-2014 гг.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы были представлены в виде докладов на Научных школах МФТИ (Школа-семинар студентов

и молодых учёных «Фундаментальные взаимодействия и космология», Долгопрудный, 2010, 2012), докладывались на рабочих совещаниях коллаборации Байкал (2010 – 2014), и Международных конференциях и совещаниях: VLVNT (2009, 2011), MANTS (2011, 2013), ICRC (2011, 2013), Baikal-GVD Scientific Advisory Committee (2014).

## Публикации

По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, в числе которых 9 статей в международных рецензируемых журналах, 7 статей в материалах международных научных семинаров и 2 статьи в материалах российских научных конференций. Список опубликованных работ приведён в конце автореферата.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 3-х глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации составляет 135 страниц, включая 68 рисунков и 10 таблиц. Список цитируемой литературы включает 53 наименования.

## Содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность работы, основанной на особой роли нейтринной астрофизики высоких энергий в построении современной картины мира и понимании процессов, происходивших на ранних этапах образования Вселенной. Описывается метод глубоководного детектирования нейтрино в естественных средах и основные эксперименты, основанные на данном методе. Формулируется цель и основные задачи исследования. Излагается научная новизна полученных результатов диссертационной работы, перечисляются положения, выносимые на защиту, и указываются данные о публикациях и апробации работы.

В **первой главе** представлен исторический обзор развития и современного состояния экспериментов по детектированию нейтрино высоких энергий в естественных средах. Рассматриваются основные принципы построения системы сбора данных нейтринных телескопов ANTARES, AMANDA, IceCube, KM3Net, HT200/HT200+. Описываются проблемы, возникающие при организации больших распределённых подводных и подлёдных измерительных систем, и методы их решения в различных проектах по созданию крупномасштабных нейтринных телескопов. Перечисляются

особенности проектируемой Байкальской установки: развертывание аппаратуры с ледяного покрова озера, ограниченность времени монтажа детектора, возможность реконфигурирования регистрирующей системы и проведения профилактических работ на установке (замена вышедших из строя узлов и модулей). Определяется оптимальный вариант организации системы сбора и передачи данных, а также обосновывается преимущество водной среды и естественного ледового покрова оз. Байкал для развёртывания современного нейтринного детектора кубокилометрового масштаба.

После проведённого анализа подходов и методов построения нейтринных телескопов, как в естественных водоёмах, так и во льду различными коллаборациями по всему миру, формулируются основные требования к построению архитектуры нейтринного детектора:

- Возможность объединения разнотипных систем в составе одной установки (регистрации, позиционирования, управления и калибровки).
- Простота реконфигурирования регистрирующей системы установки.
- Модульность и наращиваемость, обеспечивающие возможность проводить физические исследования по мере развёртывания установки.
- Эффективное использование особенностей месторасположения установки (относительно малая удалённость от берега, методика развертывания и др.).
- Надежность компонентов системы.

Во **второй главе** подробно описывается структура, техническая реализация и состав аппаратуры системы сбора данных телескопа НТ1000. Проектирование системы сбора данных было основано на ряде требований, базирующихся на особенностях географического места расположения, способах развертывания установки, подходах к подготовке регистрирующей аппаратуры и долговременной эксплуатации Байкальского глубоководного нейтринного телескопа.

Принципиальным требованием к аппаратуре Байкальского нейтринного телескопа, которое предъявлялось на первых этапах проектирования, являлась надежность её эксплуатации в режиме длительной экспозиции. Для обеспечения максимального уровня надежности было принято решение о предельном упрощении конструкции оптического модуля – основного детектирующего элемента установки. В отличие от установок IceCube и

КМ3Net, в оптическом модуле отсутствует система цифрового преобразования сигналов. Блоки цифрового преобразования вынесены в отдельный глубоководный модуль, обслуживающий группу оптических модулей. Такой подход требует создания интегрированных систем связи с оптическими модулями, состоящих как из линий передачи данных управления, так и передачи аналоговых сигналов.

В целях минимизации объема работ в процессе развертывания детектора и уменьшения его стоимости в базовой конфигурации Байкальского телескопа доведено до минимума количество оптических линий передачи данных. Это потребовало разработки новых подходов к системе передачи информации на расстояния порядка километра, которые основаны на сочетании использования относительно медленных линий связи с медными жилами и on-line процедур фильтрации данных, подавляющих фоновые сигналы.

Важным преимуществом Байкальского телескопа НТ1000 является возможность развертывания глубоководной аппаратуры со льда оз. Байкал. Реализация такой возможности требует размещения всего глубоководного комплекса модулей на вертикальных гирляндах с достаточно ограниченными связями друг с другом. Это конструктивная особенность однозначно требует организации системы сбора данных в виде разветвленной “древовидной” иерархической структуры с вершиной в центральной части группы гирлянд.

Для реализации перечисленных выше требований, система сбора данных была построена на основе четырех базовых элементов:

- Измерительного канала, включающего в свой состав фотодетектор и удаленный от него на расстояние до 100 метров аналого-цифровой преобразователь сигналов.
- Секции оптических модулей, состоящей из 12 измерительных каналов. Все каналы секции объединяются в одном блоке электроники, обеспечивающем преобразование аналоговых сигналов, функционирование триггерной логики, фильтрацию и передачу данных, управление режимами работы оптических модулей. Секция является основным структурным элементом системы сбора данных установки.
- Гирлянды, объединяющей несколько секций. Предусмотрена возможность объединения в общую систему сбора данных до 4-х секций на одной гирлянде.

- Кластера, в состав которого включены несколько гирлянд. В базовой конфигурации установки предполагается объединение 8 гирлянд в один кластер. Кластер гирлянд является законченным детектором, на базе которого могут проводить физические исследования.

### ***Измерительный канал***

Измерительный канал установки включает в свой состав фотодетектор, усилитель сигналов фотодетектора, коаксиальный кабель длиной около 90 метров, по которому передается усиленный сигнал, и блок измерения времени поступления и амплитуды сигнала. Основой регистрирующей системы телескопа НТ1000 являются оптические модули (ОМ), оснащенные фотоэлектронными умножителями R7081-100 фирмы Hamamatsu с полусферическими фотокатодами диаметром 25 см и квантовой эффективностью более 30%. ФЭУ регистрируют черенковское излучение, генерируемое в воде заряженными релятивистскими частицами – мюонами либо электромагнитными или адронными ливнями. На основании информации, полученной от группы оптических модулей, зарегистрировавших излучение, можно восстановить тип, направление движения и энергию частицы. Оптические модули для Байкальского телескопа НТ1000 были разработаны и подготовлены к работе в составе телескопа НТ1000 сотрудником ИЯИ РАН А. А. Шейфлером.

Оцифровка аналоговых сигналов, идущих с ОМ, происходит в 4-канальных платах АЦП, расположенных в центре секции из 12 оптических модулей. Функциональная схема измерительного канала платы АЦП представлена на рисунке 1.

Каждый спектрометрический канал реализован на базе АЦП AD9430, который имеет разрешение 12 бит и частоту дискретизации 200 МГц. Оцифрованный сигнал с АЦП транслируется в FPGA (Xilinx Spartan 6). Программно-аппаратный комплекс FPGA обеспечивает управление, буферизацию и первичную обработку поступающих от АЦП данных. Буфер памяти FPGA позволяет накапливать информацию о форме входного сигнала во временном интервале до 30 мкс с шагом 5 нс. Длина кадра канала и его положение на временной дорожке программируется в диапазонах 0...5 мкс и 0...30 мкс соответственно. Пример временного кадра канала представлен на рисунке 2. Временной кадр характеризуется длительностью (до 5 мкс), временным шагом измерения (5 нс), амплитудным разрешением (1.2 мВ на отсчет АЦП) и диапазоном измерения амплитуды (-2.4 В...+2.4 В).

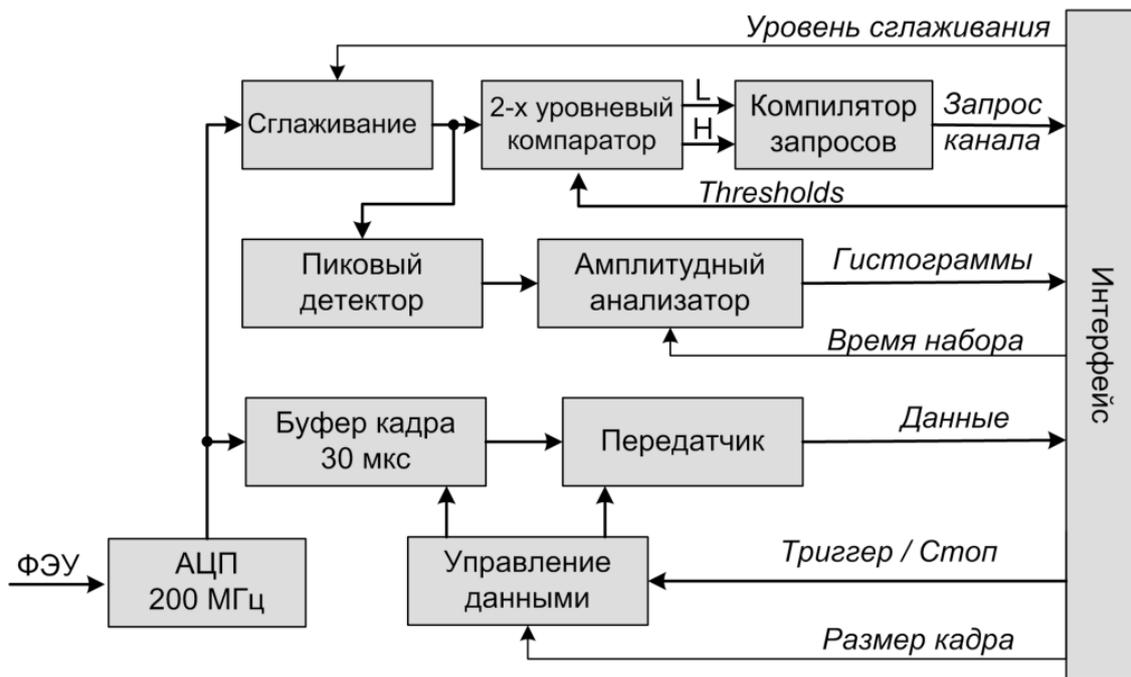


Рисунок 1. Функциональная схема канала платы АЦП

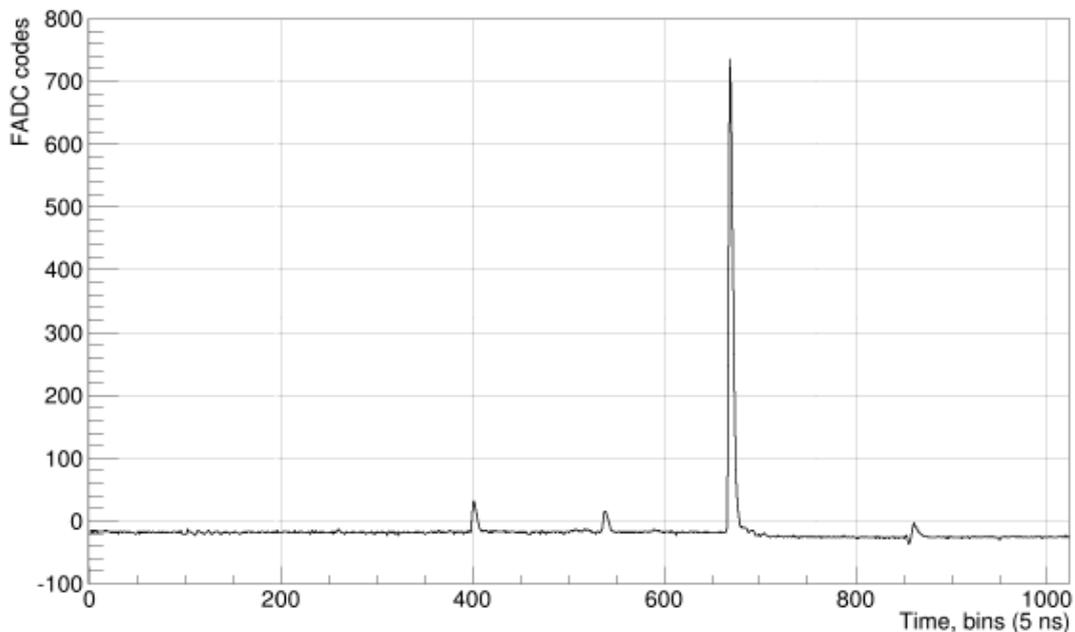


Рисунок 2. Временной кадр канала, содержащий два одноэлектронных сигнала, сигнал большой амплитуды и отраженный биполярный сигнал

Характерная ширина шумовой дорожки канала составляет величину около 10 мВ, что позволяет работать с порогами на уровне 0.3 одноэлектронных сигнала.

Выработка триггера осуществляется на основе информации, формируемой в каналах запросов плат АЦП. Каждый канал запросов включает в свой состав устройство сглаживания сигналов (уровень сглаживания от

1 до 8), двухуровневый цифровой компаратор с управляемыми порогами (низкий порог L и высокий порог H) и компилятор запросов L и H, транслируемых в триггерный блок контролера АЦП – плату Мастер. Значения порогов компаратора в зависимости от поставленной физической задачи могут варьироваться для разных каналов и, при штатном режиме работы детектора, равны 0.3 и 3 ф.э. для L и H соответственно. Ожидаемый темп регистрации событий кластера из 8 гирлянд при данных значениях порогов составляет величину порядка 100...200 Гц.

### **Секция оптических модулей**

Оптические модули каждой из гирлянд проектируемого телескопа НТ1000 сгруппированы в две секции. Секция представляет собой функционально законченный узел, включающий в себя системы регистрации излучения, обработки сигналов, калибровки, формирования триггера и передачи данных. Базовая конфигурация секции, являющаяся в настоящее время основой для дальнейшего проектирования, включает в свой состав 12 оптических модулей, расположенных на расстоянии 15 м друг от друга и центральный модуль (ЦМ). Функциональная схема электроники центрального модуля и схема секции ОМ показана на рисунке 3.

ЦМ секции оптических модулей включает в свой состав 3 платы АЦП по 4 канала каждая, блок управления и контроля питания ОМ, плату Мастер (контролер АЦП), интерфейсный бок и DSL-модем для передачи данных секции в коммуникационный модуль гирлянды (КоМ). Платы АЦП и Мастер были разработаны сотрудниками НИИЯФ МГУ, участниками Байкальского проекта, А. В. Скурихиным и В. А. Кожиним.

Электронные модули устанавливаются в специализированный крейт (механический стандарт VME) и подключаются через 96-контактные VME-разъемы к кросс-плате. Для работы в оз. Байкал крейт с электроникой устанавливается в глубоководный корпус, аналогичный корпусу оптического модуля. Для связи с оптическими модулями используются глубоководные 5-контактные разъемы, а связь с модулем гирлянды осуществляется через 9-контактный глубоководный разъем, по которому передаются сигналы запроса и подтверждения, транслируются данные и поступает электропитание 300 Вольт. Важной особенностью организации системы питания оптических модулей является её разделение с питанием электроники центра секции. Это позволяет снизить наводки от высокочастотных узлов плат оцифровки сигнала на измерительные каналы.

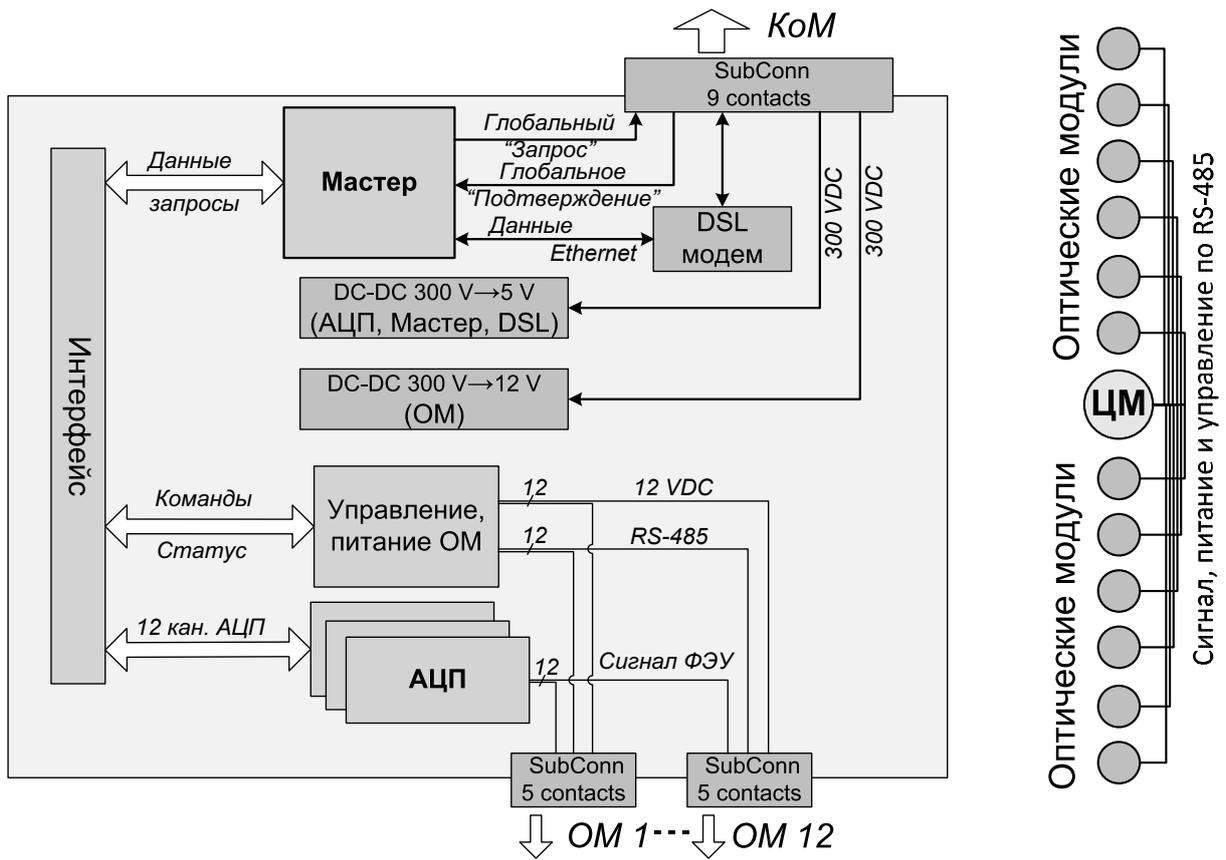


Рисунок 3. Функциональная схема электроники центрального модуля (ЦМ) и секции оптических модулей

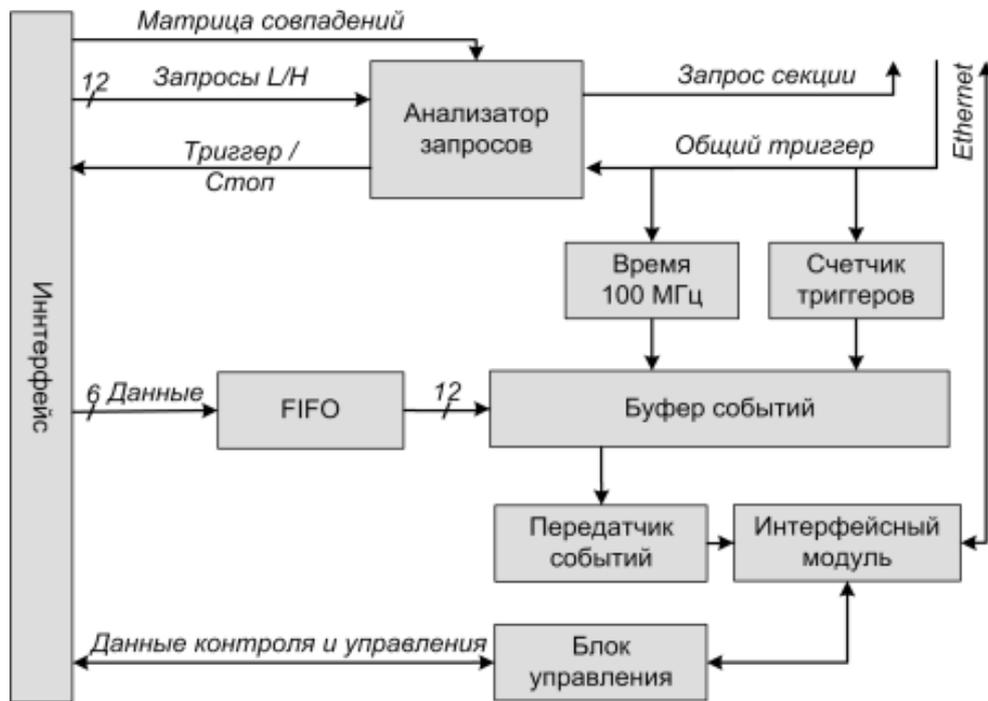


Рисунок 4. Функциональная схема платы Мастер

Плата Мастер предназначена для формирования триггера секции, чтения данных с плат АЦП и их трансляции по каналу Ethernet (интегрированный сетевой интерфейс стандарта 100BASE-TX) в центр сбора данных, а также управления работой аппаратуры. Функциональная схема платы Мастер представлена на рисунке 4.

Анализатор запросов платы Мастер формирует запрос секции в результате обработки поступающих в него запросов каналов L и H со всех плат АЦП секции. Для обработки запросов каналов используется встроенный программно-аппаратный модуль "матрица совпадений" (12H×12L), который обеспечивает максимально простой и быстрый способ генерации запроса секции. Предусмотрены два режима работы триггерной системы: мажоритарные совпадения сигналов запросов L в выбранном временном окне ("триггер L"), и совпадения L и H запросов с любых соседних оптических модулей ("триггер L&H").

Сигналы запросов всех секций направляются в центр кластера, где формируется сигнал подтверждения, являющийся общим триггером для всех гирлянд. Триггерный сигнал инициирует генерацию общего сигнала "Стоп" для всех измерительных каналов, чтение буфера данных АЦП, формирование выходного буфера (временного кадра) в модуле Мастер и его передачу в центр сбора данных. Каждый кадр, помимо информации о форме сигналов, содержит данные о номере триггера и локальное время (разрешение 10 нс). Информация о номере триггера позволяет синхронизировать события приходящие от разных секций. Данные из буфера событий передаются по линии Ethernet в центр кластера.

Аппаратно-программный комплекс платы Мастер имеет возможность проводить обработку информации в режиме реального времени (фильтрация дорожки). В основе алгоритма фильтрации лежит последовательное сравнение данных временной дорожки с заданной для каждого канала величиной порога. Превышение сигналом порога является признаком начала полезного сигнала, а уменьшение значения сигнала ниже уровня порога – окончанием сигнала. Для уменьшения влияния шумов электроники на процесс фильтрации (шумовые импульсы этого типа имеют биполярный характер) сравнение может производиться со сглаженным по 1, 2, 4 или 8 точкам сигналом. С учётом того, что на временной дорожке, как правило, фиксируются единичные полезные импульсы с длительностью 5...10 отсчетов АЦП, коэффициент сжатия данных может достигать величины порядка  $10^2$ .

### Гирлянда оптических модулей

Глубоководные модули регистрирующей системы детектора НТ1000 размещаются на вертикальных грузонесущих кабельных линиях, формируя гирлянды. Электроника гирлянды позволяет реализовывать достаточно широкий набор конфигураций регистрирующей системы, и обеспечивает возможность различных способов группировки ОМ.

На рисунке 5 представлена блок-схема гирлянды оптических модулей состоящей из двух секций по 12 ОМ. На данный момент такая конфигурация является базовой для построения первого кластера телескопа НТ1000. Оптические модули размещаются один под другим на расстоянии 15 м, формируя секцию длиной 180 м. Центральный модуль располагается посередине секции, на равном расстоянии от крайних ОМ. Все глубоководные модули крепятся на стальном грузонесущем тросе. В верхней части гирлянды находится коммутационный модуль (КоМ), который обеспечивающий прием и передачу данных гирлянды по каналам

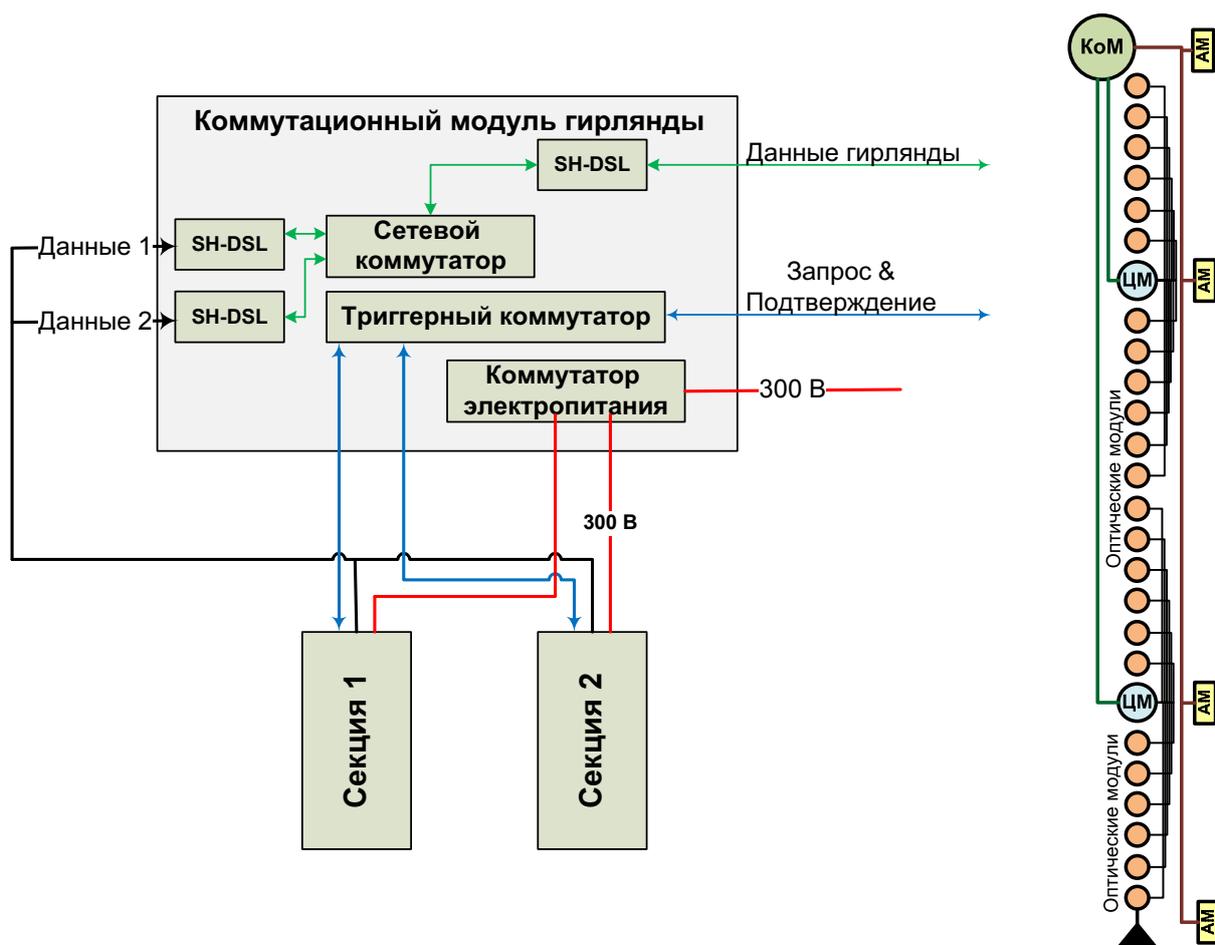


Рисунок 5. Блок-схема гирлянды оптических модулей, состоящей из двух секций

на базе DSL-модемов, синхронизацию работы секций (сигналы запрос и подтверждение) и управление электропитанием гирлянды (коммутатор 300В). Также, в состав гирлянды входят несколько акустических маяков, позволяющих организовать систему позиционирования установки. Общая длина гирлянды из двух секций составляет величину 360 м - вертикальный размер установки НТ1000.

**Кластер**

Каждый кластер Байкальского телескопа будет представлять собой полностью законченную регистрирующую систему, способную работать как в автономном режиме, так и в составе полномасштабного детектора. Базовый вариант кластера (см. рисунок 6) включает в свой состав 8 гирлянд оптических модулей, расположенных на расстоянии 60 м друг от друга. При этом каждая гирлянда будет состоять из 24 оптических модулей, а кластер будет включать в себя 192 ОМ.

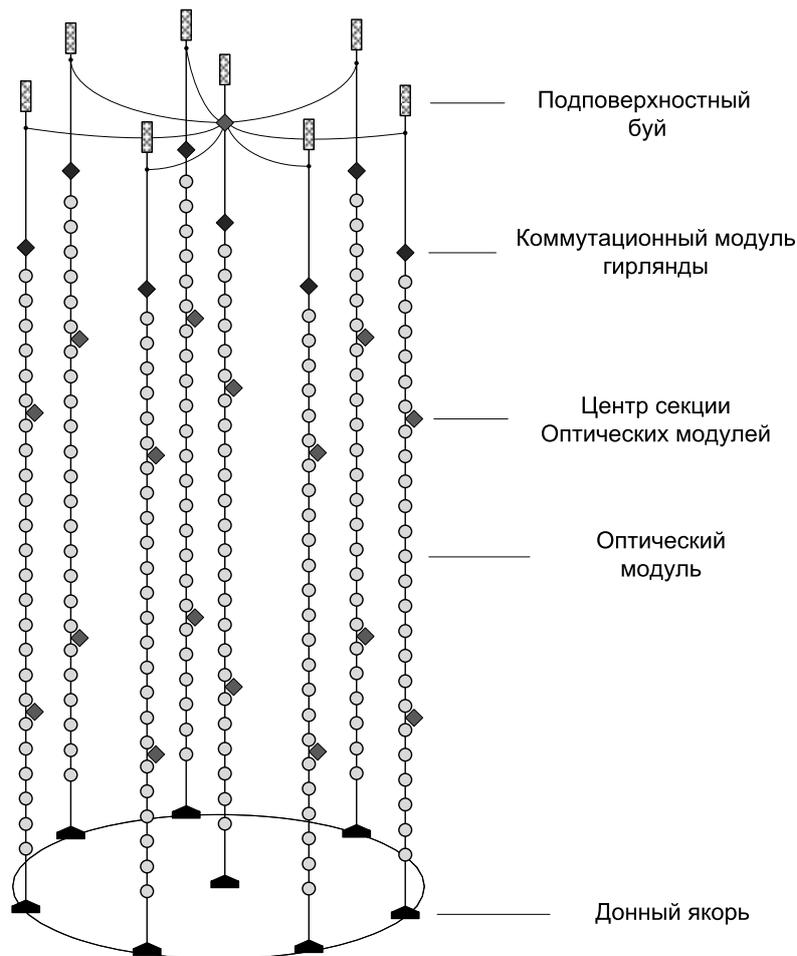


Рисунок 6. Схема размещения гирлянд кластера

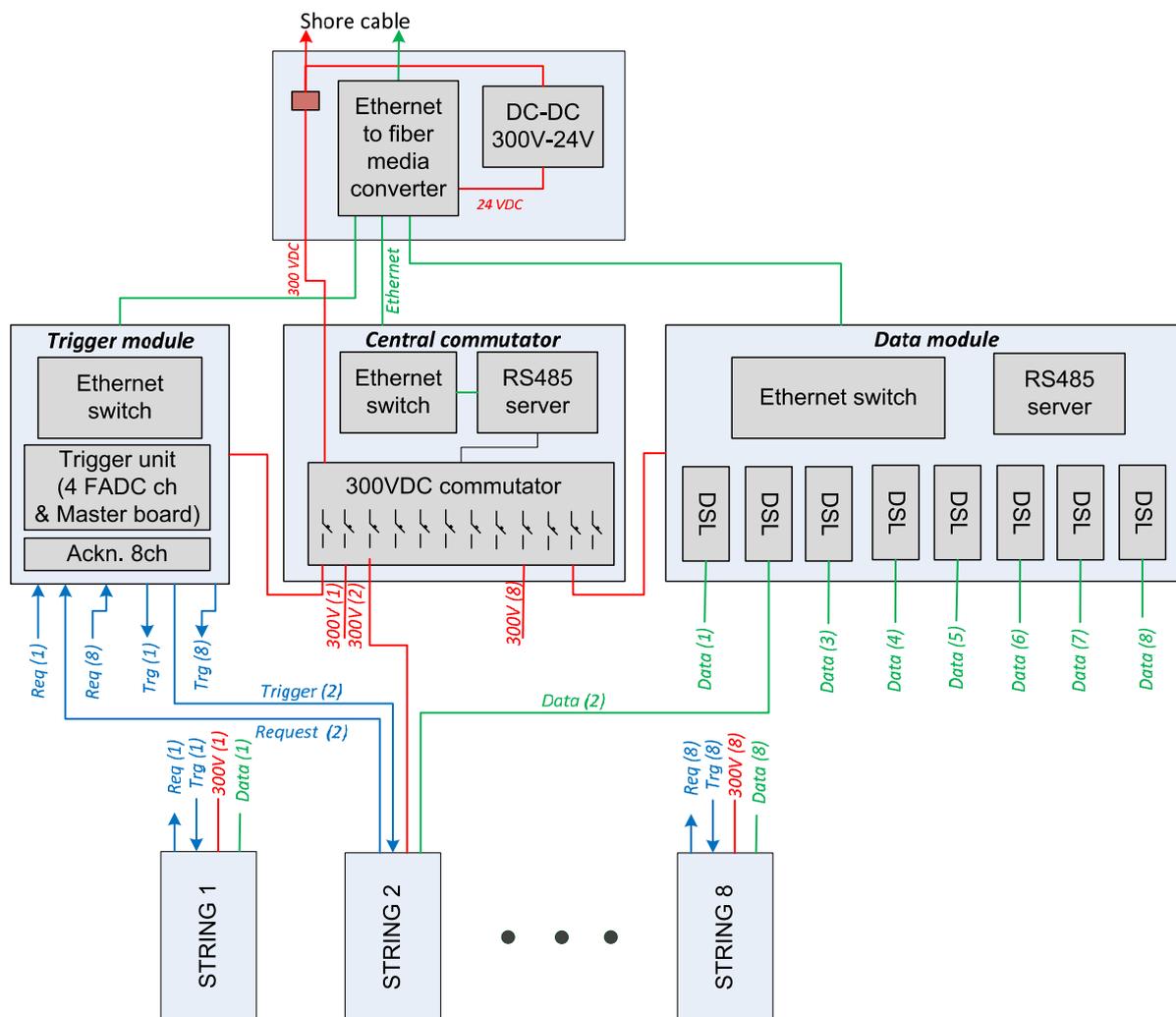


Рисунок 7. Блок-схема центра сбора данных кластера

Для управления работой гирлянд в состав кластера включен дополнительный узел – центр сбора данных кластера (Центр Кластера). Центр кластера располагается вблизи поверхности воды на глубине ~ 30 м. Он обеспечивает работу триггерной логики кластера в целом, передачу питания к каждой гирлянде и связь с береговым центром. Блок-схема электроники центра кластера показана на рисунке 7. В состав центра кластера входят четыре основных узла, размещенных в разных глубоководных корпусах: триггерный модуль, модуль электропитания, модуль данных и оптическая муфта. Необходимость распределения аппаратуры по разным корпусам связана с ограничением на максимальное энерговыделение в стеклянном глубоководном корпусе ~ 40 Ватт.

Основными элементами триггерного модуля являются плата Мастер и два блока 4-х канальных АЦП, аналогичных блокам, входящим в состав спектрометрических каналов телескопа, и имеющих тот же механизм фор-

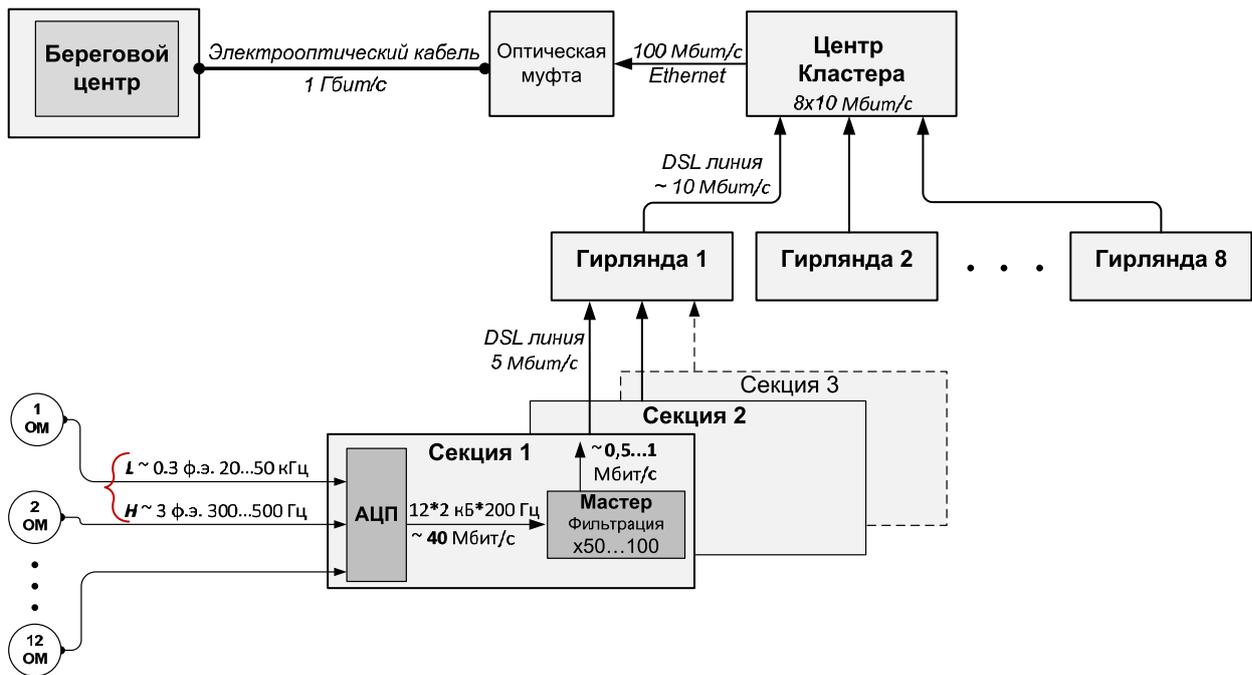


Рисунок 8. Структура подводной локальной сети

мирования триггера. Кроме указанной аппаратуры, в триггерном модуле установлен разветвитель сигналов подтверждения на 8 гирлянд, коммутатор Ethernet и преобразователь напряжения 300/24 Вольт. В состав модуля питания входит управляемый многоканальный коммутатор электропитания 300 Вольт, оснащенный системой мониторинга величины напряжения на выходе каждого канала. Модуль данных предназначен для сбора информации со всех гирлянд. Он включает в свой состав 8 DSL-модемов, коммутатор Ethernet и 8-канальный сервера RS-232 для удалённого управления скоростью работы модемов. Центр кластера подключен к Береговому Центру (БЦ) через оптическую муфту при помощи двух оптоволоконных линий Ethernet (технология 1000Base-LX), пропускная способность каждой из которых составляет 1 Гбит/с.

Подводная локальная сеть телескопа NT1000 представляет собой разветвлённую структуру топологии “звезда”, состоящую из группы каналов связи, по которым производится обмен информацией между различными узлами детектора. На рисунке 8 представлена структура подводной локальной сети с точки зрения потоков данных и необходимых пропускных способностей линий. При штатном синхронном режиме работы кластера с триггером, основанном на совпадении сигналов двух соседних оптических модулей с порогами 0.3 и 3 ф.э., ожидаемый темп регистрации событий с 8 гирлянд составляет величину порядка 100...200 Гц. Размер несжатого ка-

дра с каждого из каналов 12 бит АЦП составляет 2 КБ, поэтому при темпе счёта 200 Гц поток данных со всех каналов АЦП к плате Мастер в центре секции равен  $\sim 40$  Мбит/с. На данном участке сети внутренний интерфейс обмена данными позволяет работать на скоростях до 1000 Мбит/с и, таким образом, не ограничивает общий темп счёта установки.

Следующий уровень сети центр секции – модуль гирлянды, имеет протяжённость порядка нескольких сотен метров, и пропускная способность линии ограничена возможностями DSL модемов (до 15 Мбит/с). Аппаратно-программный комплекс платы Мастер позволяет проводить фильтрацию дорожек в режиме реального времени с фактором сжатия  $\times 50 \dots 100$ . Таким образом, реальный поток данных от одной секции будет не более 1 Мбит/с. В штатной конфигурации гирлянды из 2-х секций скорость SHDSL-модемов вручную ограничена до 5696 Кбит/с. Потоки данных секций собираются в коммутационном модуле гирлянд и транслируются в центр кластера (рассматриваются варианты компоновки детектора с 3-мя или 4-мя секциями в составе гирлянды). Длина линии данных от КоМ до центра кластера чуть более 1 км и SHDSL-модемы ограничивают пропускную способность на уровне 10 Мбит/с. Реальный поток данных от 2-х секций с учётом фильтрации составит около 2 Мбит/с, что в пять раз ниже максимально возможного.

Электропитание аппаратуры кластера НТ1000 осуществляется от берегового источника питания (БИП) с постоянным напряжением  $\sim 450$  В. В соответствии с иерархической структурой установки, система управления электропитанием кластера разделена на два уровня (см. рисунок 9). Первый уровень включает в себя управляемый 12-канальный коммутатор электропитания гирлянд, который размещен в центре кластера. Коммутаторы второго уровня установлены на каждой гирлянде в глубоководных коммутационных модулях. Они позволяют проводить независимое включение и отключение электропитания секций гирлянд. Такая организация электропитания обеспечивает устойчивую работу системы в целом при выходе из строя отдельных ее элементов (гирлянд и секций). 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.

Независимое включение и выключение каждого канала осуществляется по локальной сети Ethernet посредством СОМ-сервера (преобразователя Ethernet/RS485) и промышленного модуля дискретного 16-канального вы-

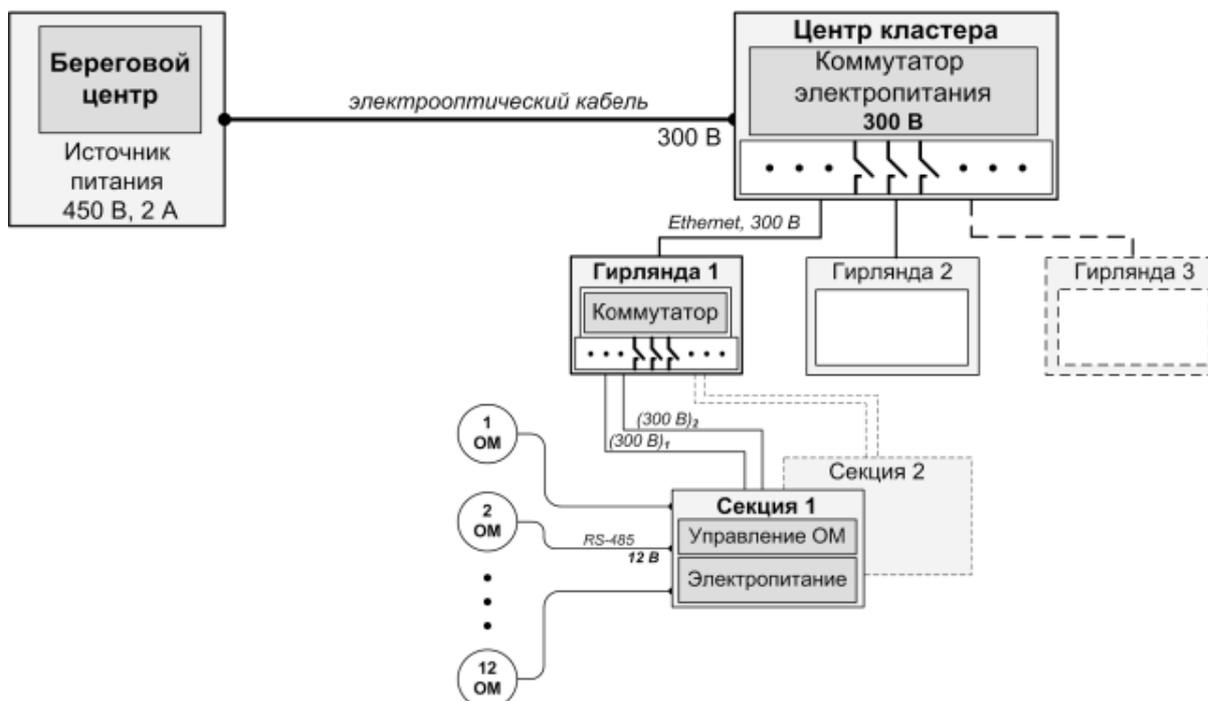


Рисунок 9. Блок-схема системы управления электропитанием кластера

вода ICP DAS I-7045. Мониторинг питающего напряжения осуществляется 20-канальным модулем аналогового ввода ICP DAS I-7017Z. Считываемые данные с каналов АЦП записываются в отдельный блок мониторинговых данных и передаются на обработку в береговой центр.

В заключение второй главы приводятся основные структурные особенности разработанной системы сбора данных телескопа NT1000:

- Унификация системных блоков: секция, гирлянда, кластер.
- Распределённая система регистрации в пределах секции: ФЭУ – ОМ – ЦМ.
- Элементарная детектирующая единица – оптический модуль, сочетающий максимальную простоту и надёжность, в то время как измерительная электроника находится за пределами ОМ (АЦП в центре секции).
- Использование наносекундных аналогово-цифровых преобразователей, позволяющих получать временную развертку по каждому из измерительных каналов телескопа.
- Синхронная работа кластера. В противовес асинхронной работе, для которой необходимы быстрые линии передачи данных и жёсткие триггерные условия.
- Использование экономичных линий передачи данных на основе xDSL технологий с дополнительной on-line фильтрацией данных.

**Третья глава** посвящена долговременным натурным испытаниям системы сбора данных телескопа НТ1000 в оз. Байкал.

Начиная с 2009 г. работы по созданию Байкальского телескопа НТ1000 находятся на стадии комплексных долговременных испытаний его элементов и функциональных систем в составе автономных модулей функционирующих в натуральных условиях. Первый этап реализации программы комплексных испытаний в течение 2010-2012 гг. был нацелен на изучение характеристик элементов регистрирующей системы НТ1000 – оптических модулей, спектрометрических каналов, триггерной системы, узлов электропитания, калибровочной системы и ряда других в режиме долговременной эксплуатации.

Весной 2013 года в оз. Байкал была введена в эксплуатацию установка, состоящая из трех гирлянд оптических модулей, расположенных на глубинах 900 – 1200 м, и технологическая гирлянда с 8 оптическими модулями, предназначенная для исследований светового фона оз. Байкал на относительно малых глубинах (до 600 м). В 2014 году установка была дополнена ещё двумя гирляндами: одной с 24 оптическими модулями, другой с 16 оптическими модулями и отдельной сферой со светодиодными источниками (LED-матрица) для временной калибровки каналов детектора. Структурная схема установки показана на рисунке 10.

На этапах разработки первого кластера НТ1000 в 2013-2014 годах был окончательно сформирован состав аппаратуры центральных модулей секций и коммутационных модулей гирлянд, подготовлен универсальный центр кластера (ЦК), поддерживающий подключение до восьми гирлянд, проведен отбор DSL технологии для системы передачи данных с учётом необходимой пропускной способности подводной локальной сети.

Эффективность работы системы сбора данных (мертвое время, доля потерянных событий, информативность данных) определяется темпом поступления физических событий, размером событий, скоростью передачи и возможностями промежуточной буферизации получаемой информации. Темп поступления событий определяется порогами регистрации каналов, условиями формирования триггера и величиной фонового свечения. Необходимость регистрации установкой сверхслабых световых потоков (вплоть до единичных фотонов) требует установки порогов каналов на одноэлектронном уровне (0.3 – 1 ф.э.) и использование предельно “мягких” триггерных условий (двойные совпадения соседних оптических модулей). В этих условиях фактором, определяющим темп счета каналов, является

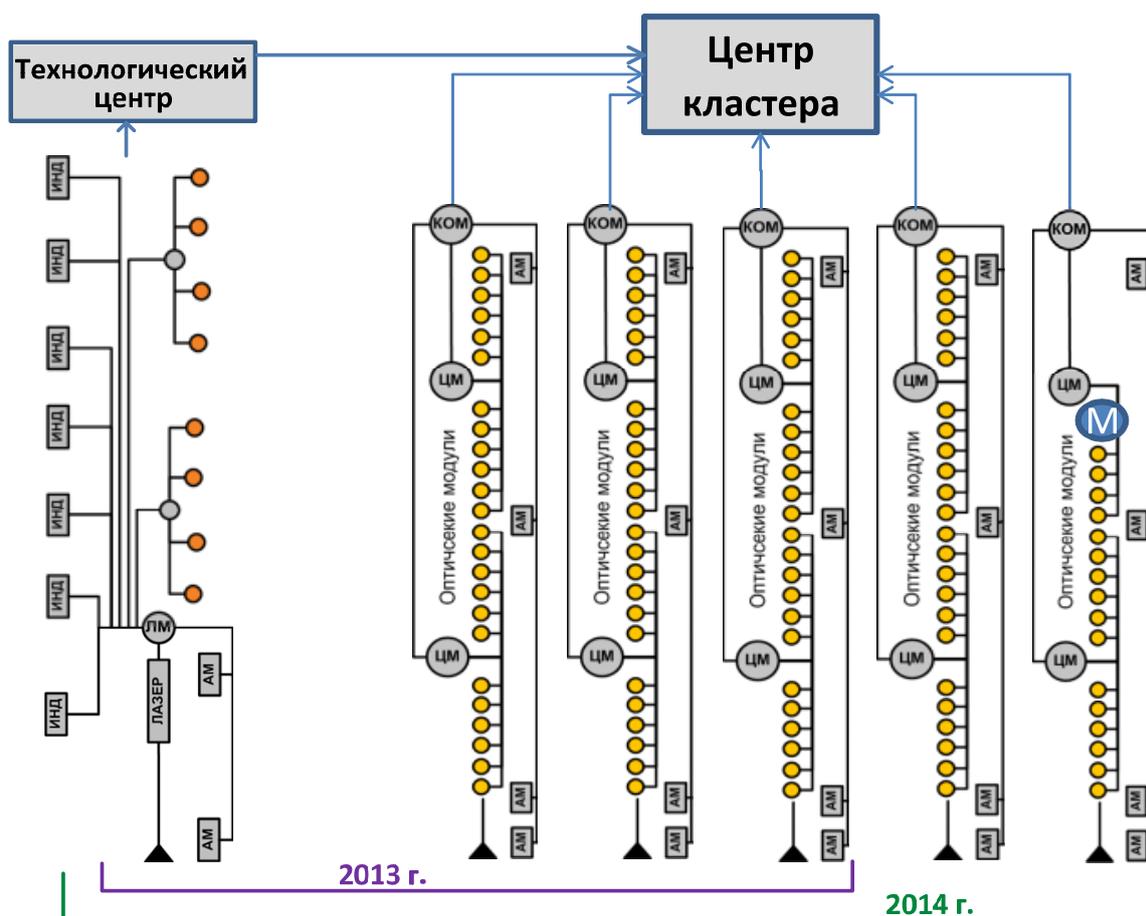


Рисунок 10. Пять гирлянд НТ1000 и технологическая гирлянда, установленные в оз. Байкал в 2013-2014 гг.

собственное свечение воды оз. Байкал. Характерная величина темпа счета каналов, определяющая частоту поступления событий, составляет 15–20 КГц и может существенно увеличиваться в период повышенной световой активности озера. Максимальная скорость передачи событий определяется пропускной способностью наименее быстродействующего сегмента канала данных (в нашем случае – сегмент, связывающий гирлянды с центром кластера).

Проверка качества связи осуществляется для каждого узла береговой и подводной сети посредством периодической отправки пакетов до исследуемого узла и определения времени отклика данного узла. Для единичной проверки используется утилита для проверки соединений в сетях на основе TCP/IP (ping). В качестве примера, на рисунке 11 представлен результат годового мониторинга состояния наиболее критичного сегмента сети: гирлянда – центр кластера.

После замены VDSL2-модемов на более помехоустойчивые SHDSL-модемы (апрель 2014) видно характерное уменьшения времени отклика

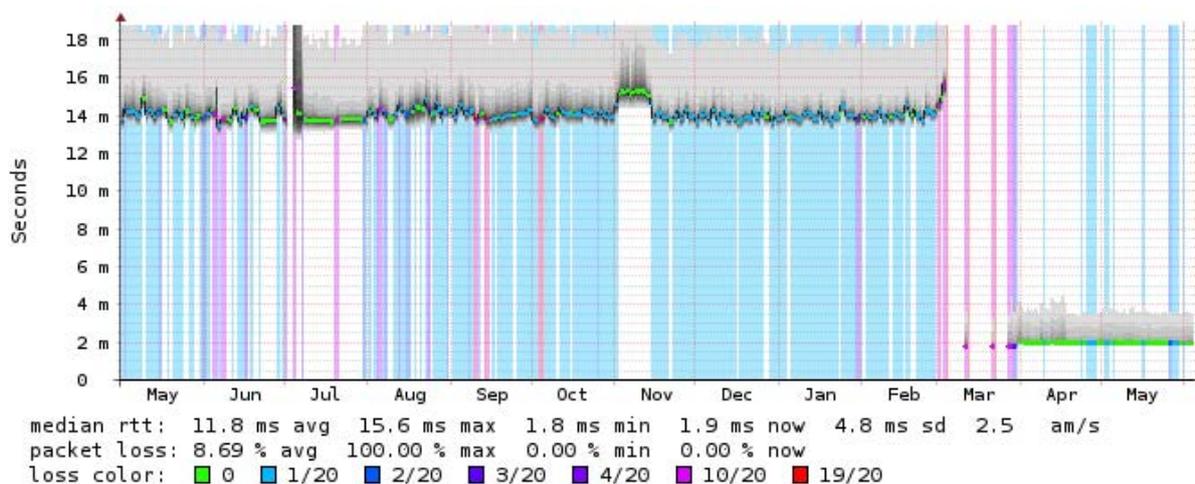


Рисунок 11. Временной отклик сетевого узла КоМ 2-ой гирлянды с 05.2013 по 05.2014.

и улучшение качества связи. Время отклика составило около 2 мс, при этом количество временных интервалов с потерей одного пакета из 20-ти существенно сократилось. Скорость соединения возросла примерно в 7 раз. Участок графика с отсутствием связи в марте вызван отключением установки в период экспедиционных работ. В результате проверки можно сделать следующие выводы:

- Сегмент, связывающий Береговой центр с центром кластера, благодаря применению оптической линии связи, работает надежно и обеспечивает необходимую скорость передачи данных.
- Скорость передачи данных в сегментах, связывающих гирлянды с центром кластера, варьируется от 1 до 6 Мбит/с для VDSL2-модемов и от 7 до 10 Мбит/с для SHDSL-модемов.
- Темп регистрации событий детектора определяется скоростью передачи данных наименее быстродействующего сегмента подводной локальной сети, которая составляет от 7 до 10 Мбит/с для участка ЦК – КоМ.
- При размере несжатого события с каждого канала - 2 Кб, необходимый темп счёта гирлянды из 24 ОМ равный 100 Гц достигается только путем аппаратной фильтрации дорожек в центральных модулях секций.

Одним из важных критериев качества работы системы сбора данных является характер распределений временных интервалов между событиями и распределений по количеству событий, зарегистрированных за фиксированный промежуток времени. Значимых отклонений экспериментальных

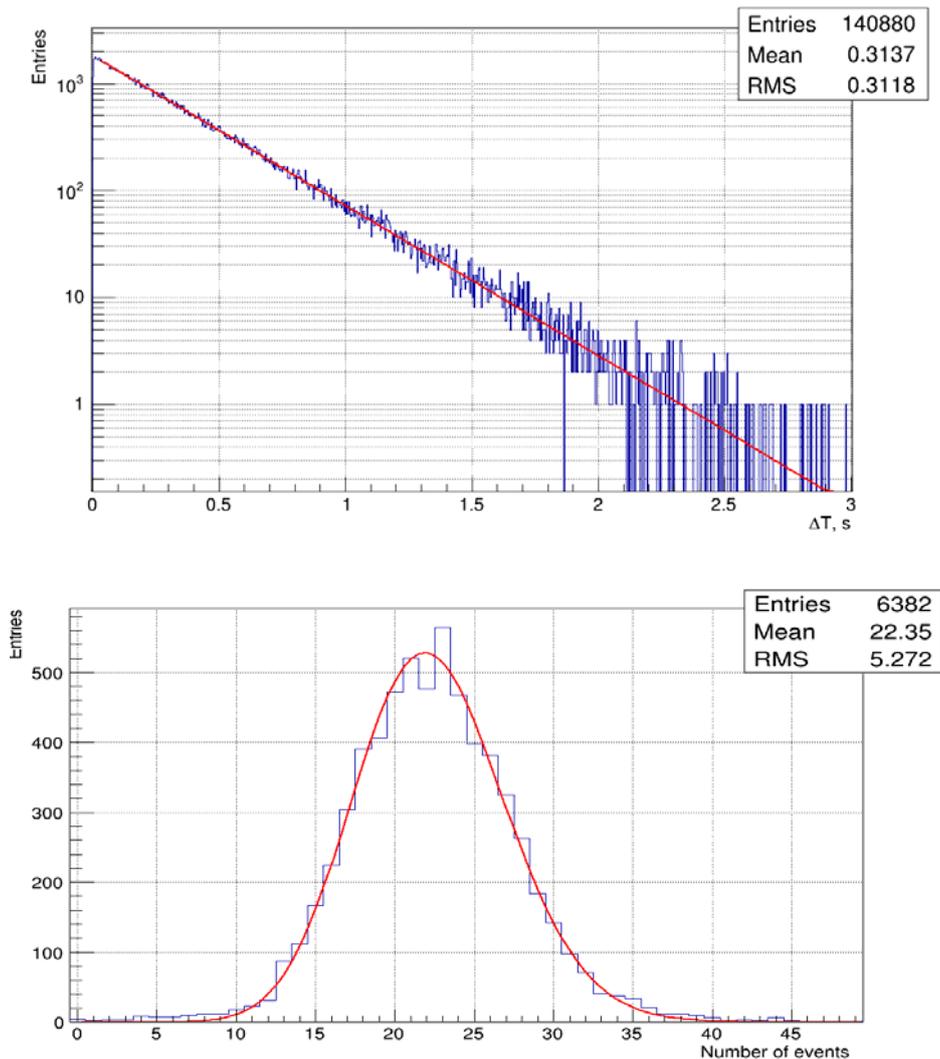


Рисунок 12. Пример распределение временных интервалов между событиями (сверху) и распределения по количеству событий (снизу), зарегистрированных каналом за фиксированные промежутки времени (7 секунд)

распределений от ожидаемых не было выявлено. В качестве примера указанные распределения показаны на рисунке 12 для одного из каналов.

Комплексной проверкой функциональности системы управления и сбора данных является качество ее работы в режиме обслуживания калибровочных процедур детектора. Калибровка установки предполагает возможность гибкого управления и точной настройки режимов функционирования калибровочной аппаратуры, оптических модулей, измерительных каналов, триггерной системы. Калибровка регистрирующей системы телескопа осуществляется в трех основных режимах работы системы сбора данных: режиме амплитудной калибровки каналов, режиме временной калибровки каналов и режиме временной калибровки межсекционных задержек. Для

проведения калибровочных процедур используются светодиоды оптических модулей (предусмотрено два светодиода в каждом ОМ) и тестовые импульсы, генерируемые контроллерами ОМ. Амплитуды сигналов светодиодов и задержка между их световыми импульсами устанавливаются в зависимости от режима калибровки. Кроме светодиодных источников в отдельных случаях для калибровки используются лазерный источник света, атмосферные мюоны и собственное свечение воды оз. Байкал.

На рисунке 13 показано распределение измерительных каналов установки по величине одноэлектронной амплитуды, определенной при анализе шумовых дорожек каналов. Средняя одноэлектронная амплитуда составляет величину около 30 каналов АЦП, ширина распределения около 10%. Полученные распределения подтверждают эффективность работы системы сбора данных в режиме амплитудной калибровки каналов.

Калибровочные светодиодные источники ОМ позволяют провести временную калибровку гирлянд. Благодаря достаточно большой интенсивности вспышек, сигналы, генерированные светодиодами оптического модуля, регистрируются ФЭУ, установленными в секциях соседних гирлянд. Калибровочные коэффициенты определяются на основании информации о взаимном расположении гирлянд и оптических модулей в установке.

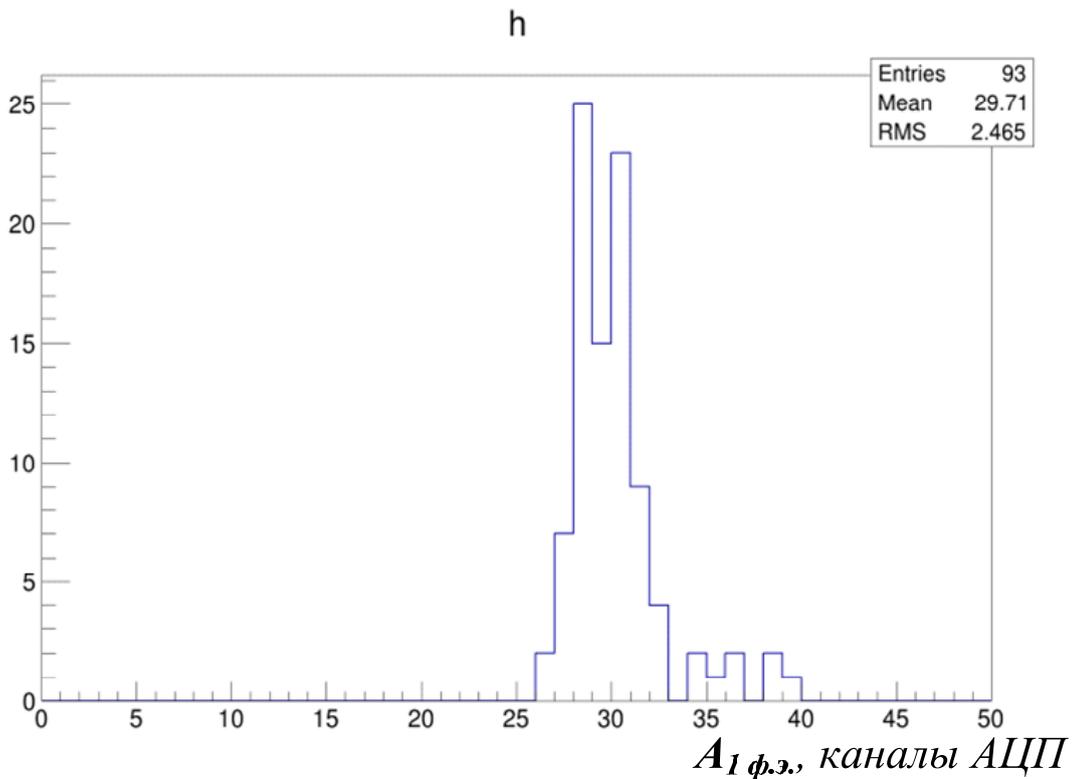


Рисунок 13. Распределение измерительных каналов установки по величине средней одноэлектронной амплитуды

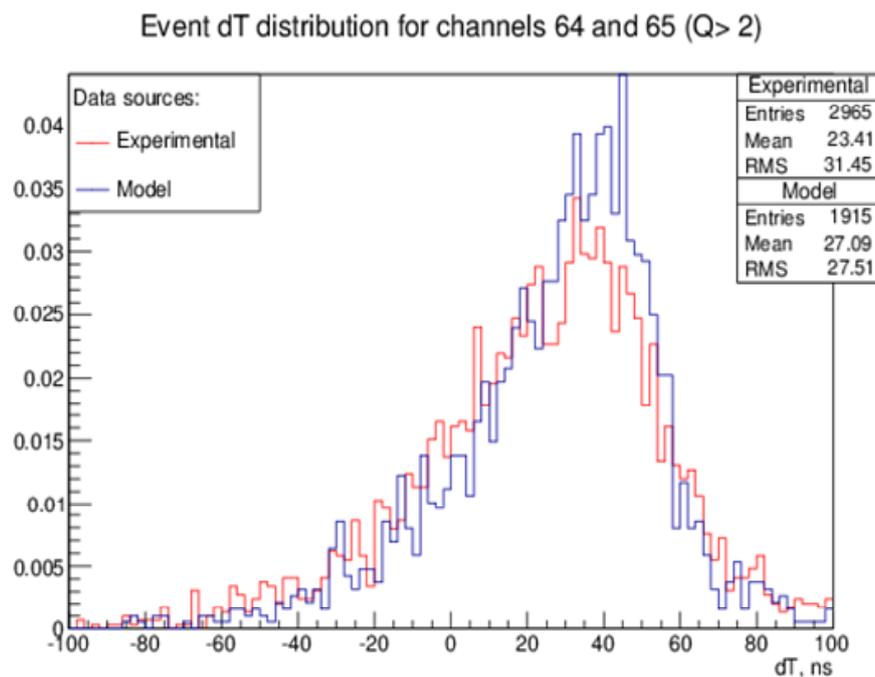
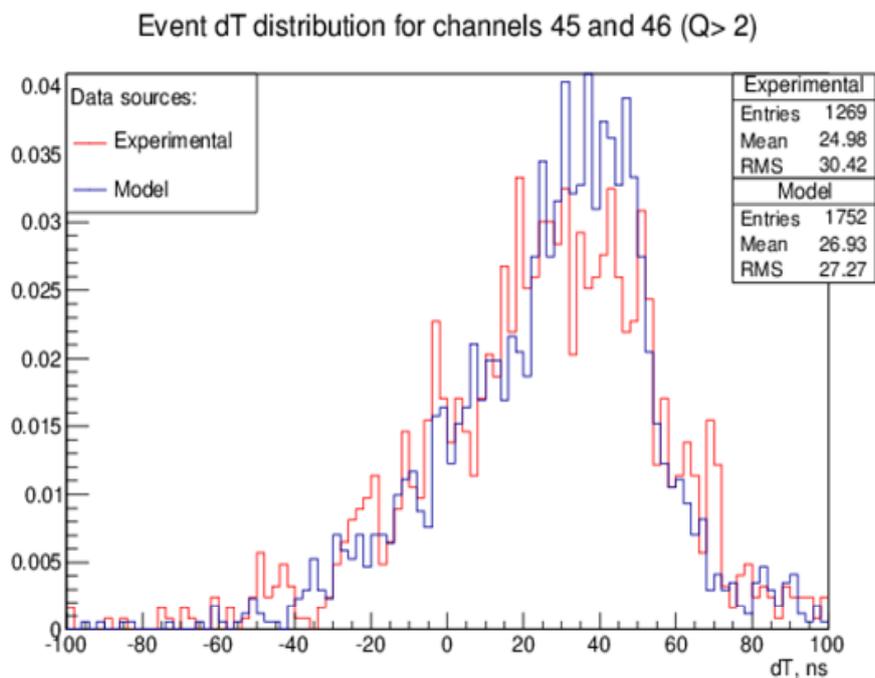


Рисунок 14. Мюонная временная калибровка каналов

В этом режиме калибровки система управления оптическими модулями генерирует пары световых импульсов, задержанных во времени друг относительно друга на 500 нс. Это обеспечивает надежный способ выделения калибровочных сигналов из шумов ФЭУ.

Независимый контроль качества проведения калибровки под управлением системы сбора данных установки может быть осуществлен по данным, полученным при регистрации потока атмосферных мюонов. Для

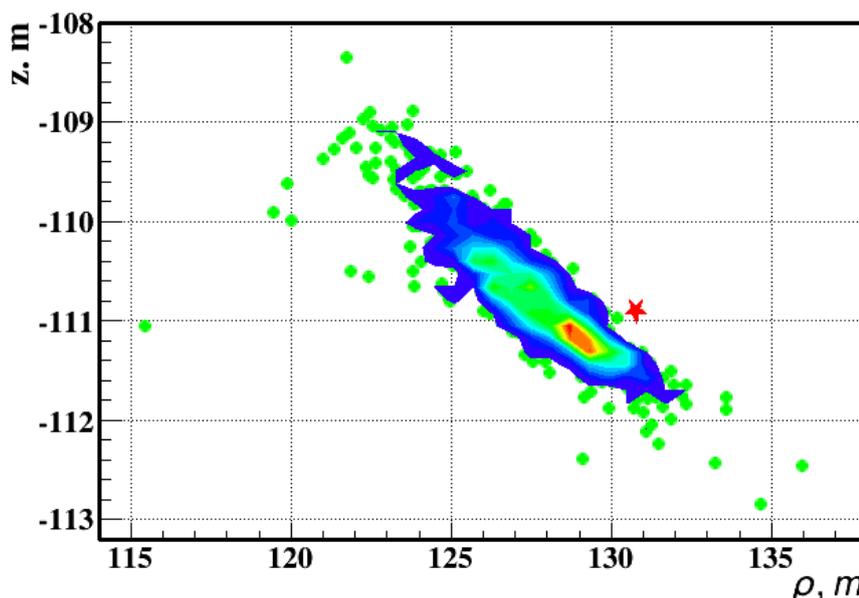


Рисунок 15. Восстановление положения лазера двумя гирляндами кластера

этого измеренные распределения задержек сигналов соседних ОМ, зарегистрировавших излучение мюона, сопоставляются с результатами моделирования. Измерения осуществляются в режиме экспозиции установки в потоке космического излучения. В качестве триггера используются четырехкратные совпадения сигналов от оптических модулей одной секции. Выборочные результаты проверки представлены на рисунке 14.

В качестве комплексной проверки калибровочных процедур, полученные временные калибровочные коэффициенты каналов были использованы для восстановления положения лазерного источника света (взаимное расположение гирлянд и лазера было определено независимым методом с использованием акустической системы позиционирования установки).

На рисунке 15 представлены результаты восстановления положения лазера двумя гирляндами кластера:  $\rho$  и  $z$  – положение кластера в цилиндрической системе координат, звездочкой показано реальное местоположение лазера. Для восстановления были использованы калибровочные коэффициенты, полученные методом измерения задержек ФЭУ.

На основании представленной информации можно сделать вывод, что разработанная система управления и сбора данных предоставляет все необходимые возможности для осуществления амплитудной и временной калибровки детектора.

В **Заключении** приводятся основные результаты работы:

1. Разработана системы сбора данных, обеспечивающая интегрирование разнородных регистрирующих и информационных систем (оптической

системы регистрации, акустической системы позиционирования, калибровочной и мониторинжной аппаратуры) в составе единой регистрирующей системы.

2. Разработанный подход к построению системы передачи данных, основанный на использовании относительно медленных линий передачи в сочетании с процедурами фильтрации информации с временных дорожек, позволил отказаться от оптических линий передачи данных, тем самым существенно сократив время развертывания установки.
3. Разработана конструкция и созданы глубоководные модули для установки аппаратуры системы управления и сбора данных, размещаемые в центре секций, на каждой из гирлянд и в центре кластера. Оптимизирована система подводных межмодульных коммуникаций.
4. Обеспечена достаточно высокая надёжность работы системы. Сбои в системе передачи данных от одной из гирлянд в 2013 году, обусловленные использованием не промышленных VDSL-модемов были устранены в 2014 году за счет перехода на более защищенные SHDSL-модемы. При этом скорость передачи данных повысилась более чем в пять раз.
5. Проверка работы системы сбора данных в различных режимах работы – экспозиции в потоке космического излучения, амплитудной и временной калибровки каналов и гирлянд, регистрации сигналов от светодиодных и лазерных источников света – показала достаточно высокий уровень ее функциональности, обеспечивающий поддержку всех необходимых режимов работы установки.
6. Проведены долговременные натурные испытания созданной системы сбора данных на первой очереди кластера НТ1000 2013 – 2014 гг., подтверждающие надёжность её функционирования.

### **Список публикаций по теме диссертации**

1. Aynutdinov V. et al. Baikal neutrino telescope – An underwater laboratory for astroparticle physics and environmental studies // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2009. – Vol. 598. – Iss. 1. – P. 282-288.
2. Aynutdinov V. et al. The BAIKAL neutrino experiment – Physics results and perspectives // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2009. – Vol. 602. – Iss. 1. – P. 14-20.
3. Aynutdinov V. et al. The prototype string for the km<sup>3</sup>-scale Baikal neutrino telescope // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2009. – Vol. 602. – Iss. 1. – P. 227-234.
4. Аврорин А. В. и др. Статус Байкальского нейтринного эксперимента // Известия РАН. Серия физическая. – 2009. – том 73, – № 5, – С. 682-684.

5. Aynutdinov V. M. et al. Baikal neutrino project: history and prospects // Russ. Phys. J. – 2010. – Vol. 53. – Iss. 6. – P. 601-610.
6. Кулешов Д. А., Айнутдинов В. М. Байкальский глубоководный нейтринный телескоп НТ1000 // Труды 53-й научной конференции МФТИ, ч. VIII «Проблемы современной физики» / МФТИ. – Долгопрудный, 2010.
7. Avrorin A. et al. The Baikal neutrino experiment // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2011. – Vol. 626-627. – Suppl. – P. S13–S18.
8. Aynutdinov V. et al. The Baikal neutrino project: Present and perspective // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2011. – Vol. 628. – Iss. 1. – P. 115-119.
9. Аврорин А. В. и др. Экспериментальная гирлянда Байкальского нейтринного телескопа НТ1000 // Приборы и Техника Эксперимента. – 2011. – № 5. – С. 55-65.
10. Avrorin A. et al. The Baikal neutrino telescope - Results and plans // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2011. – Vol. 630. – Iss. 1. – P. 115-118.
11. Avrorin A. et al. The Gigaton Volume Detector in Lake Baikal // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2011. – Vol. 639. – Iss. 1. – P. 30-32.
12. Аврорин А. В. и др. Статус Байкальского нейтринного эксперимента // Известия РАН. Серия физическая. – 2011. – том 75, – № 3, – С. 443-444.
13. Кошель Ф. К., Кулешов Д. А., Смагина А. А. Анализ работы аппаратуры и фоновых условий регистрации экспериментального кластера глубоководного нейтринного телескопа НТ1000 // Труды 55-й научной конференции МФТИ, «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук» / МФТИ. – Долгопрудный, 2012.
14. Avrorin A. et al. Status of the BAIKAL-GVD project // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2012. – Vol. 692. – P. 46-52.
15. Avrorin A. et al. Current status of the BAIKAL-GVD project // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2013. – Vol. 725. – P. 23-26.
16. Avrorin A. et al. Present status of the BAIKAL-GVD project development // J. of Phys.: Conf. Ser. – 2013. – Vol. 409. – Iss. 1.
17. Avrorin A. et al. The prototyping/early construction phase of the BAIKAL-GVD project // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. – 2014. – Vol. 742. – P. 82-88.
18. Аврорин А. В. и др. Система сбора данных Байкальского нейтринного телескопа НТ1000 // Приборы и Техника Эксперимента. – 2014. – № 3. – С. 28-39.