

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Аврорин Александр Дмитриевич

**РЕГИСТРАЦИЯ МЮОНОВ НА ГЛУБОКОВОДНОМ
НЕЙТРИННОМ ТЕЛЕСКОПЕ ВАИКАЛ-GVD**

Специальность 01.04.01 —
«приборы и методы экспериментальной физики»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физ.-мат. наук
В. М. Айнутдинов

Москва — 2016

Оглавление

	Стр.
Введение	4
Глава 1. Обзор методов регистрации мюонов в крупномасштабных нейтринных телескопах	11
1.1 Принцип работы нейтринных телескопов	14
1.1.1 Излучение Вавилова-Черенкова	17
1.1.2 Оптические характеристики наблюдаемых сред	18
1.2 AMANDA	20
1.3 IceCube	24
1.4 ANTARES	27
1.5 NT-200	30
Глава 2. Глубоководный нейтринный детектор Baikal-GVD	34
2.1 Конструкция нейтринного телескопа	35
2.2 Система регистрации и сбора данных Baikal-GVD	39
2.2.1 Оптический модуль Baikal-GVD	40
2.2.2 Секция оптических модулей	43
2.2.3 Гирлянда	47
2.2.4 Кластер	48
2.3 Триггерная система кластера Baikal-GVD	50
2.3.1 Аппаратура триггерной системы	51
2.3.2 Оптимизация триггерных условий Baikal-GVD	54
2.4 Монтаж нейтринного телескопа в оз. Байкал	59
2.4.1 Подготовка ледового лагеря	61
2.4.2 Установка и техническое обслуживание гирлянд Baikal-GVD	62
Глава 3. Пакет обработки данных BARS	65
3.1 Требования к пакету обработки данных Baikal-GVD	65
3.2 Архитектура MARS	66
3.3 Архитектура BARS	69

Глава 4. Подготовка данных в Baikal-GVD	73
4.1 Типы данных	76
4.2 Контроль качества данных	77
4.3 Калибровка измерительных каналов	78
4.3.1 Калибровка кабельных коммуникаций	78
4.3.2 Амплитудная калибровка каналов	81
4.3.3 Временная калибровка каналов	83
4.4 Определение положений фотодетекторов в момент события.	88
4.4.1 Предварительная обработка акустических данных	90
4.4.2 Вычисление геометрии установки	91
4.4.3 Особенности акустических данных	92
4.4.4 Контроль качества акустических данных	94
4.4.5 Результаты	95
4.5 Подавление шумовых импульсов.	96
Глава 5. Анализ мюонных данных	99
5.1 Экспериментальные данные	100
5.2 Регистрация мюонов секцией Baikal-GVD	105
5.2.1 Анализ работы каналов секции по атмосферным мюонам	105
5.2.2 Результаты	110
5.3 Формирование событий	115
5.4 Методика восстановления параметров мюонных траекторий	117
Заключение	121
Список литературы	123
Список рисунков	130
Список таблиц	135

Введение

Целью данной работы является разработка и программная реализация алгоритмов обработки мюонных событий, зарегистрированных Baikal-GVD. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследование методов и подходов, ранее разработанных для обработки данных нейтринных телескопов NT-200 [1], AMANDA [2], IceCube [3] и ANTARES [4].
2. Разработка архитектуры системы обработки данных и элементов базового программного обеспечения для нейтринного телескопа Baikal-GVD.
3. Оптимизация режимов работы триггерной системы установки с целью достижения максимальной эффективности регистрации мюонных событий.
4. Разработка алгоритмов и программного обеспечения для калибровки измерительных каналов и определения положения фотодетекторов нейтринного телескопа.
5. Анализ эффективности разработанных алгоритмов и программного обеспечения на базе экспериментальных данных, полученных на кластере Baikal-GVD.

Научная новизна:

1. Впервые были разработаны алгоритмы и программы, обеспечивающие мюонную калибровку данных, восстановление мюонных событий для создаваемой на озере Байкал уникальной установки - нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD. Использование специализированных языков программирования и библиотек в области обработки больших массивов данных позволило на порядки увеличить скорость и ввести дополнительные возможности анализа и обработки для научных исследований в области нейтринной астрофизики высоких энергий.
2. Впервые была разработана архитектура системы обработки данных BARS, состоящая из блоков с унифицированным форматом входных и промежуточных данных, что позволяет доступ исследователям на любой стадии обработки данных. Такая архитектура дает возможность

разрабатывать приложения для каждого из блоков без перенастройки всей системы, облегчает доступ исследователям к данным с использованием индивидуальных систем обработки и является необходимым шагом к системе «открытых данных», которая необходима для эффективной работы в Глобальной сети нейтринных телескопов, учрежденной в рамках соглашения с IceCube, ANTARES и KM3Net о «Глобальной нейтринной обсерватории» от 13 октября 2013 года.

3. Были исследованы и использованы оригинальные алгоритмы, позволившие автоматизировать трудоемкие этапы обработки данных.

Практическая значимость

Все разработанные в результате исследований алгоритмы, архитектура системы обработки данных, калибровки и восстановления событий используются для обработки данных действующего кластера телескопа Baikal-GVD. Результаты работы были использованы как для настройки и отладки вновь устанавливаемых систем телескопа, так и для регистрации мюонных событий и решения других исследовательских задач.

Методология и методы

Диссертационная работа проводилась с использованием методологии и методов, разработанных и практически опробованных в течение многолетнего опыта исследований по созданию и эксплуатации предыдущей модификации телескопа NT-200+, но с использованием новейших достижений информационных технологий и методов обработки больших массивов данных с физических установок. Основными принципами достижения достоверности результатов были сравнение результатов математико-компьютерного моделирования физических процессов и реакции регистрирующих систем телескопа на события прохождения вторичных мюонов с результатами обработки данных, получаемых регистрирующей системой телескопа, а также статистическая оценка достоверности данных. Для разработки оптимальной архитектуры системы обработки данных автор принял участие на всех этапах создания и установки компонентов телескопа.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты оптимизации режима работы триггерной системы Baikal-GVD для регистрации мюонов (эффективная площадь кластера для мюонов с энергией 10 ТэВ составляет $\sim 2 \times 10^4 \text{ м}^2$).

2. Архитектура системы обработки данных “BARS” нейтринного телескопа Baikal-GVD, обеспечивающая стандартизацию структур данных, процесса их обработки и физического анализа.
3. Алгоритм и пакет программ для мюонной калибровки данных.
4. Результаты подготовки данных для восстановления мюонных событий, а именно результаты калибровки каналов, формирования событий и определения координат оптических модулей в момент регистрации события.
5. Результаты мюонной калибровки каналов, позволяющие определить величину межканальных временных сдвижек и стабильность работы каналов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается практикой апробацией результатов в процессе настройки и эксплуатации телескопа, статистически точном совпадении с результатами компьютерного моделирования, результатами обсуждений со специалистами, рекомендацией научной коллаборации «Байкал», апробацией результатов в выступлениях на российских и международных конференциях и семинарах, публикациями в рецензируемых научных журналах. Результаты диссертационной работы находятся в соответствии и не противоречат результатам работ других авторов.

Актуальность

К 2011 году уровень знаний о диффузном потоке нейтрино в диапазоне энергий ($10^{13} - 10^{18}$) эВ, о локальных источниках нейтрино с энергией свыше 10 ГэВ, о природном потоке быстрых магнитных монополей и о проявлениях массивных частиц темной материи был сформирован, главным образом, результатами экспериментальных исследований на Байкальском глубоководном нейтринном телескопе НТ200, на детекторе AMANDA на Южном полюсе и (в последние 2009, 2010 годы) на детекторе ANTARES в Средиземном море. Ввод в строй в 2011 году детектора IceCube на Южном полюсе позволил, в ряде задач, поднять чувствительность экспериментальных исследований еще на один-два порядка величины. Самым существенным вкладом IceCube в нейтринную астрофизику высоких энергий послужила первая в мире регистрация нейтрино высоких энергий Ernie и Bert с энергиями около 1 ПэВ [5].

На повестке дня стоит задача создания в Северном полушарии детектора(ов) способного(ых) вести изучение центра нашей Галактики на уровне чувствительности, соизмеримой с детектором IceCube, но с гораздо лучшим углом

вым разрешением восстановления мюонных траекторий. Это связано с тем, что длина рассеяния света в антарктическом льду мала по сравнению с озёрной и морской водой [6], что служит обоснованием для разработки водных кубокилометровых нейтринных телескопов, наблюдающих южное небо. Дальше всех в решении этой задачи продвинулась сейчас Байкальская коллаборация, где в 2015 г. завершено создание первого кластера из 8 гирлянд с 36 оптическими модулями на каждой - базового элемента детектора кубокилометрового масштаба ВАИКАЛ-GVD.

Природными источниками черенковского излучения, инициирующими регистрируемые события в нейтринном телескопе, являются релятивистские мюоны и высокоэнергичные каскады элементарных частиц. С целью определения физических характеристик этих источников разработаны методы выделения физических событий из экспериментального набора данных нейтринного телескопа. Создана обширная библиотека расчетных программ, включающая в себя как программы моделирования процесса распространения черенковского излучения в прозрачных средах (в воде, во льду) и отклика фотоприемников нейтринного телескопа на это излучение, так и программы восстановления мюонных траекторий, а также координат и энергии высокоэнергичных ливней. С целью анализа и оперативной обработки очень большого объема данных Байкальских нейтринных телескопов была реализована стандартная схема обработки данных BARS (Baikal Analysis and Reconstruction Software), которая выглядит как цепочка из независимых стандартных блоков, выполняющих конкретные действия над данными.

Апробация работы

Основные результаты докладывались на следующих конференциях:

1. A. D. Avrorin, “Baikal-GVD: status and plan”, SAO-BNO, The International Workshop on Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy: Neutrino Signals, Supernovae and Gamma-Ray Bursts, Terskol, Russia, October 7 - 14 2015.
2. A.D. Avrorin “Data handling of the Baikal experiment”, Baikal Technical Advisory Board, 30 January 2015
3. A.D. Avrorin et al., “The first construction phase of the Baikal-GVD neutrino telescope”, Proc. of the 34th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2015, Hague, Netherlands)

4. A.D. Avrorin et al, “Baikal-GVD: first cluster Dubna“, Proc. of European Physical Society Conference on High Energy Physics (PoS EPS-HEP 2015, Vienna, Austria)
5. A.D. Avrorin et al, ”Status and perspectives of the BAIKAL-GVD project”, Roma International Conference on AstroParticle Physics (RICAP-14), 2014, Noto, Italy, September 30 – October
6. A.D. Avrorin et al, “Status of the Baikal-GVD Project”, Proc. of 16th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics: Particle Physics at the Year of Centenary of Bruno Pontecorvo : Moscow, Russia, August 22-28, 2013, (ed.) A.Studenikin, 2015, 98-101.
7. A. D. Avrorin et al. “Status and recent results of the BAIKAL-GVD project “, The International Workshop on Prospects of Particle Physics: “Neutrino Physics and Astrophysics”, February 1-8, Valday, Russia
8. Рабочие совещания коллаборации Байкал (2012 - 2016).

Личный вклад автора

Автор принимал активное участие в создании первого кластера нейтринного телескопа «Baikal-GVD», в исследованиях и создании архитектуры системы обработки данных BARS, в исследованиях и разработке алгоритмов и программ для мюонной калибровки и восстановления мюонных событий, в калибровке и обработке данных, полученных в 2013-2015 годах.

Публикации.

Всего по теме диссертации опубликовано 5 работ в рецензируемых международных и российских журналах:

1. A. D. Avrorin et al. Status and recent results of the Baikal-GVD project // Physics of Particles and Nuclei 46.2 (2015): 211-221.
2. A. D. Avrorin et al. Sensitivity of the Baikal-GVD neutrino telescope to neutrino emission toward the center of the galactic dark matter halo // Письма в ЖЭТФ 101.5 (2015): 289-294.
3. А. В. Аврорин, А. Д. Аврорин и др. Система сбора данных Байкальского нейтринного телескопа НТ1000 // Приборы и техника эксперимента 57.3 (2014): 262-273
4. A. D. Avrorin et al. The prototyping/early construction phase of the BAIKAL-GVD project // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 742 (2014): 82-88.

5. A. D. Avrorin et al. Data acquisition system for the Baikal-GVD neutrino telescope // Journal of Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei, 47.6 (2016)

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения.

Введение работы содержит обоснование актуальности проделанной работы, краткое описание практической значимости и используемой методологии. Также, введение описывает научную новизну полученных результатов.

Первая глава диссертации посвящена обзору используемых методов регистрации мюонов в существующих крупномасштабных нейтринных телескопах. Глава начинается с описания общих принципов работы нейтринных детекторов в естественных средах. Приводится перечисление наблюдаемых источников, типы сигнатур регистрируемых событий и общие принципы устройства детекторов, а также краткое описание излучения Вавилова-Черенкова и особенности его распространения в наблюдаемых существующими нейтринными телескопами средах. Глава завершается описанием методов регистрации мюонов в четырёх нейтринных телескопах: AMANDA, IceCube, ANTARES и NT-200. В описании приведены особенности устройства установок и оптических свойств наблюдаемых сред, применяемые методы калибровки, подавления шумов и обработки данных.

Вторая глава содержит подробное описание конструкции Baikal-GVD. Она состоит из описания основных компонентов системы сбора данных детектора, описания триггерной системы и процедуры монтажа и технического обслуживания гирлянд телескопа. Также приведены результаты оптимизации триггерных условий установки.

В **главе 3** представлено описание архитектуры используемого в Baikal-GVD пакета обработки данных BARS (Baikal Analysis and Reconstruction Software). Описана архитектура ядра BARS - пакета обработки данных эксперимента MAGIC MARS, требования и подход к обработке данных.

Глава 4 описывает подготовку полученных детектором данных к физическому анализу. В ней представлено описание типов информации, получаемой от детектора и используемые методы контроля их качества. Эта глава также содержит подробное описание методов и результатов временной и амплитудной калибровки каналов установки, методы и результаты обработки данных

системы акустического позиционирования установки. Глава завершается кратким описанием используемых методов подавления шумов, приводится подробное описание фильтрации шумов с помощью принципа причинности.

В **пятой главе** диссертации представлено описание анализа результатов регистрации мюонов Baikal-GVD. Приведено описание источников мюонных событий. Особое внимание уделено продуктам аннигиляции гипотетических частиц тёмной материи. Приведено описание набранных экспериментальных данных. Представлены результаты анализа работы каналов по атмосферным мюонам и общий подход к восстановлению параметров мюонных траекторий.

В **заключении** приводятся результаты проделанной работы, а также выражаются благодарности тем, кто оказывал содействие в её реализации.

Полный объём диссертации составляет 135 страниц с 89 рисунками и 3 таблицами. Список литературы содержит 70 наименований.

Глава 1. Обзор методов регистрации мюонов в крупномасштабных нейтринных телескопах

Существующие сегодня нейтринные детекторы позволяют регистрировать нейтрино с энергиями от 10^5 эВ. Такие детекторы можно разбить на три класса, в соответствии с границами наблюдаемого энергетического спектра (см. Рис.1.1) и методами регистрации [6].

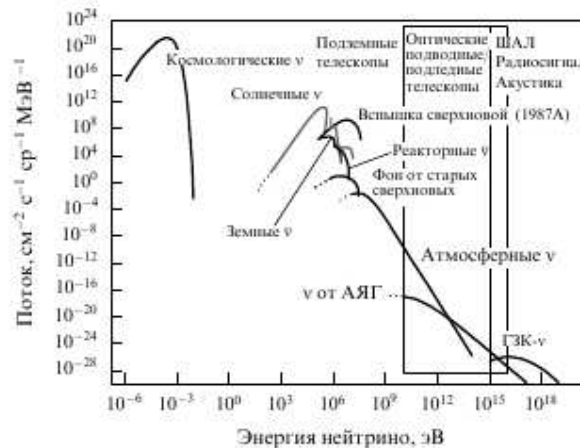


Рисунок 1.1 — Природные потоки нейтрино на уровне Земли [6]

Нижней полосе нейтринного спектра ($10^5 - 10^9$ эВ) соответствуют радиохимические детекторы, детекторы на основе жидкого или пластического сцинтилляторов и водные черенковские детекторы. К ним относятся, в частности, SuperKamiokande [7], SNO [8] и BNO [9]. Регистрация нейтрино с энергиями выше 10^{17} эВ связывается с крупномасштабными акустическими детекторами в естественных средах, регистрацией широких атмосферных ливней или нейтринного радиосигнала. Наконец, в диапазоне энергий $10^9 - 10^{16}$ эВ регистрация нейтрино осуществляется с помощью крупномасштабных черенковских детекторов, наблюдающих естественные среды [10]. Такие детекторы в дальнейшем, для краткости, будем называть нейтринными телескопами, исключая из рассмотрения подземные и наземные детекторы. Необходимо признать, что успехи подземных черенковских детекторов проложили дорогу к созданию крупномасштабных нейтринных телескопов в естественных средах, работающих в области более высоких энергий.

Исторически, принцип работы крупномасштабных нейтринных телескопов был предложен академиком М.А. Марковым [10] в 1960м году. На Между-

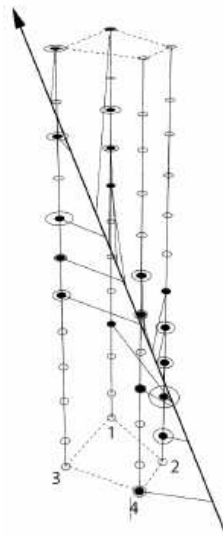


Рисунок 1.2 — Восходящий мюон, зарегистрированный Байкальским нейтринным телескопом [13]

народной конференции по космическим лучам 1973 года был предложен проект DUMAND (Deep Underwater Muon and Neutrino Detector - Глубоководный Детектор Мюонов и Нейтрино) [11]. Детектор должен был располагаться в 40 км от побережья Гавайских остров, на глубине 4.8 км. По изначальным планам, DUMAND должен был состоять из 20000 ФЭУ и охватывать кубокилометр воды. Из-за технической сложности развёртывания такой установки, конфигурация DUMAND менялась со временем. Итогом таких изменений стал проект значительно меньшей установки DUMAND-II, состоящей из 216 ФЭУ, организованных в цилиндр радиусом 50 м и высотой 230 м [12]. В 1993 году было установлено 3 гирлянды DUMAND-II, необходимых для восстановления траекторий мюонов. Однако, из-за протекания стеклосфер на первой гирлянде, установка потеряла связь с берегом. Проект DUMAND был закрыт в 1995 году.

Несмотря на неудачу проекта DUMAND, он дал начало развитию первого поколения нейтринных телескопов: NT-200, AMANDA, NEMO [14], NESTOR [15] и ANTARES. Первым нейтринным телескопом, способным восстанавливать мюонные траектории стал телескоп коллаборации Baikal, расположенный в оз. Байкал на глубине ~ 1.1 км в 3.6 км от берега. Первая гирлянда телескопа была установлена в 1984 году, вторая в 1986, и, наконец в 1993 году была установлена третья гирлянда. В 1994 году Байкальский нейтринный телескоп стал первым в мире крупномасштабным черенковским детектором в естественных средах, зарегистрировавшим нейтринный сигнал (см. Рис. 1.2). В 1998 году

начался набор данных на конфигурации НТ-200 Байкальского нейтринного телескопа, состоящей из 192 ФЭУ, в 2005-2007 годах было установлено 3 внешних гирлянды.

Опыт установки нейтринных телескопов первого поколения позволил перейти ко второму поколению - кубокилометровым детекторам, аналогичным первому варианту проекта DUMAND. К таким проектам относятся Baikal-GVD, KM3Net и IceCube. Baikal-GVD - следующий шаг развития Байкальской нейтринной обсерватории, будет состоять из функционально независимых модулей (кластеров), расположенных на оз.Байкал. В 2015 году было развёрнут первый кластер Baikal-GVD. К 2020 году планируется установка первой очереди телескопа, состоящей из 12 кластеров объёмом порядка 0.5 км^3 [6]. Вторая очередь телескопа будет наблюдать объём $\sim 1.5 \text{ км}^3$.

KM3Net - результат объединения усилий коллабораций NEMO, NESTOR и ANTARES. Аналогично Baikal-GVD, KM3Net состоит из независимых блоков. Однако, в отличие от Baikal-GVD, блоки KM3Net будут географически разнесены. Блоки KM3Net будут размещены в трёх регионах: Тулонском заливе, побережье Сицилии и возле города Пилос (Греция), по два блока в каждом. Каждый блок KM3Net обладает объёмом порядка $0.5-0.8 \text{ км}^3$. В настоящий момент KM3Net находится на стадии отладки аппаратуры и процедуры монтажа блоков. Конечной целью KM3Net является создание нейтринного телескопа с общим объёмом $3-5 \text{ км}^3$.

Развитием проекта AMANDA послужил проект антарктического детектора IceCube, содержащего 5160 ФЭУ. На сегодняшний день IceCube - единственный функционирующий детектор второго поколения. В августе 2011 и январе 2012 года IceCube впервые зарегистрировал два астрофизических события высоких энергий Ernie ($1.04 \pm 0.16 \text{ ПэВ}$) и Bert ($1.14 \pm 0.17 \text{ ПэВ}$) [5].

Гипотетическим третьим поколением нейтринных телескопов станет объединение существующих установок второго поколения в глобальную нейтринную обсерваторию.

1.1 Принцип работы нейтринных телескопов

Нейтринный телескоп представляет собой сеть фотодетекторов, помещённых в естественную среду. Расстояние между фотодетекторами составляет от десятков до сотен метров. В существующих и планирующихся установках в качестве наблюдаемой среды выступают антарктический лёд, озёрная или морская вода. Фотодетекторы регистрируют свечение от вторичных мюонов и ливней, образующихся при взаимодействиях астрофизических нейтрино с нуклонами наблюдаемой среды:

$$\begin{aligned}\nu_l(\bar{\nu}_l) + N &\xrightarrow{CC} l^-(l^+) + hadrons \\ \nu_l(\bar{\nu}_l) + N &\xrightarrow{NC} \nu_l(\bar{\nu}_l) + hadrons\end{aligned}$$

где l - лептон, CC - заряженный ток, NC - нейтральный ток. Также регистрируется свечение от ливней, образованных при резонансном рассеянии электронного антинейтрино на электроны с энергией в резонансе $E_0 = 6.3 \times 10^6$ ГэВ.

$$\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow W^- + \dots \quad (1.1)$$

Другим источником сигналов служат атмосферные мюоны, образующиеся в результате распада пионов, рожденных взаимодействием космических лучей с атмосферой [16]:

$$\begin{aligned}\pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \rightarrow e^+ + \nu_e + \nu_\mu + \bar{\nu}_\mu \\ \pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu + \bar{\nu}_\mu\end{aligned}$$

Как видно из Рис. 1.1, для энергий меньше 10^{12} эВ поток атмосферных нейтрино, а, следовательно, и мюонов, на порядки больше астрофизических. В силу этого, сигнал от атмосферных мюонов - один из основных источников шумов нейтринных телескопов, вне зависимости от конфигурации. Однако, в отличие от мюонов, нейтрино с энергиями $\lesssim 1$ ПэВ могут проходить через Землю. Поэтому, в восходящих событиях соотношение сигнала и шума значительно лучше, чем в нисходящих и нейтринные телескопы сконфигурированы для регистрации преимущественно восходящих событий (см. Рис 1.3). На энергиях

выше 1 ПэВ Земля становится непрозрачной для нейтрино и такой подход не работает. Однако, на настолько высоких энергиях атмосферные шумы на порядки ниже сигнала и необходимость в выделении восходящих событий отпадает.

Все существующие и планируемые крупномасштабные нейтринные телескопы имеют общие конструктивные особенности, восходящие к проекту DUMAND. В качестве фотодетекторов используются *фотоэлектронные умножители* (ФЭУ). ФЭУ и управляющая электроника помещаются в корпус, образуя *оптический модуль* (ОМ) - регистрирующий канал нейтринного телескопа. Корпусом ОМ обычно служат полностью либо частично прозрачные стеклосферы с низким содержанием радиоактивных материалов, хотя существуют и другие форм-факторы. ОМ и управляющая электроника детектора фиксируются на вертикальных несущих конструкциях - *гирляндах*. Гирлянды могут быть жёсткими конструкциями (как, например, в прототипе КМЗNeT [17]), или гибкими, как в ANTARES или Baikal-GVD. Гирлянды телескопа полностью погружены в наблюдаемую среду на глубину, достаточную для того, чтобы исключить влияние дневного света и космических лучей на регистрирующую систему телескопа. Нейтринный телескоп, в таком случае, представляет собой набор гирлянд, организующих ОМ телескопа в пространственную решётку фотодетекторов. Откликом телескопа на физические события является информация об амплитудах и временах срабатываний вершин такой решётки. Существующие детекторы различаются преимущественно структурой ОМ, их расположением на гирлянде и организацией системы сбора данных и управления установкой.

Нейтринные телескопы могут различать два типа источников: мюонные траектории и каскады высоких энергий (см. Рис. 1.3). Каскады нейтринные телескопы регистрируют как расширяющийся световой фронт от заряженных частиц ливня (в основном электронов и позитронов). Сигнал от вторичного мюона нейтринные телескопы видят как траекторию фотодетекторов, сработавших от черенковского излучения мюона.

Сигнатуры событий, наблюдаемых в результате взаимодействий нейтрино с наблюдаемой средой, представлены на Рис. 1.4 [18]. Рассмотрим их подробнее.

Сигнатура регистрации электронных нейтрино представлена на Рис. 1.4 (а) и состоит из одного электромагнитного ливня. Отклик нейтринных телескопов на ливень определяется его угловым распределением; на энергиях выше 101 ГэВ угловое распределение электронного компонента ливня не зависит

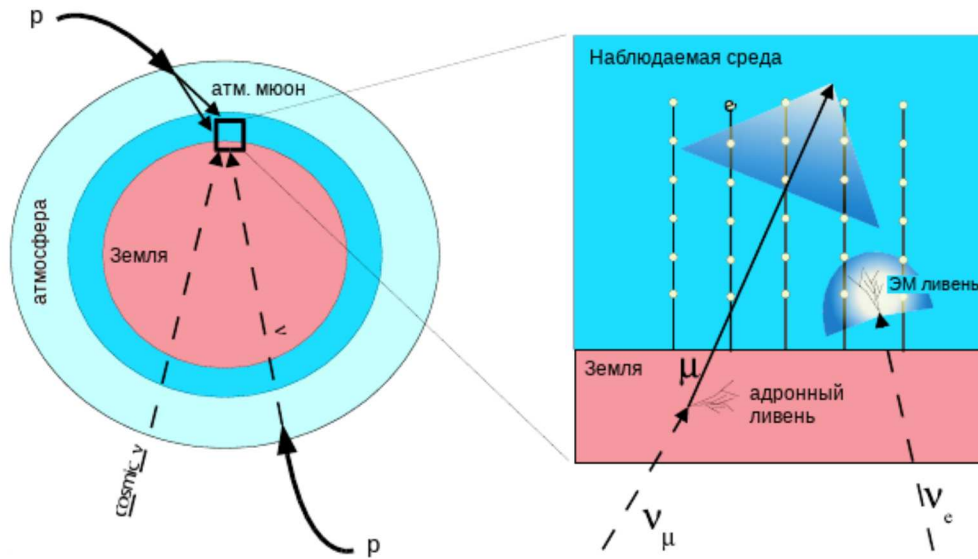


Рисунок 1.3 — Принцип работы нейтринного телескопа [16]

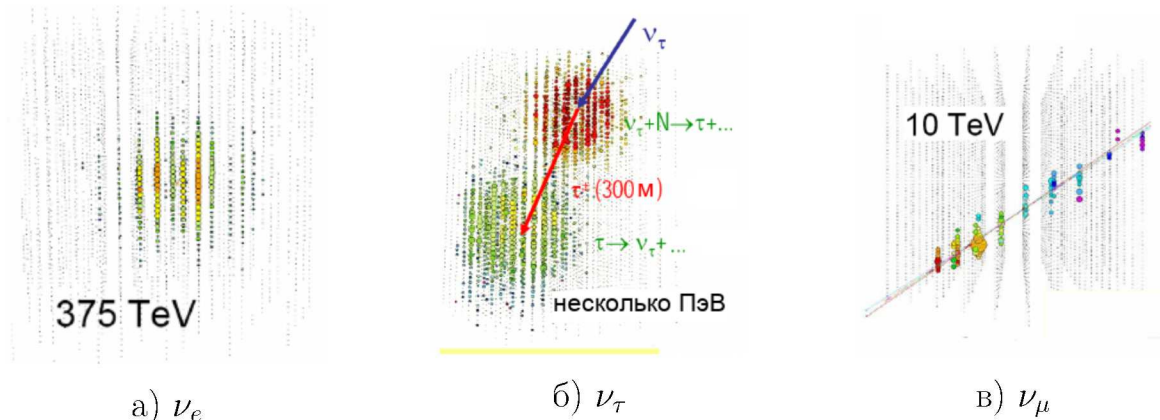


Рисунок 1.4 — Типы событий, регистрируемых нейтринными телескопами (по данным моделирования IceCube [18]). Точки обозначают фотодетекторы, сферы - сработавшие фотодетекторы. Цвет сферы (от красного к фиолетовому) соответствует времени срабатывания.

от пространственных координат. Поперечный размер ливня (характеризуется мольеровским радиусом) почти не влияет на отклик.

Сигнатура τ -лептонов состоит из двух ливней (см. Рис. 1.4 (б)). Первый ливень возникает при рождении τ -лептона, второй - при его распаде. Этот канал чувствителен на высоких энергиях, когда τ -лептон успевает пройти большое расстояние (сотни метров) перед распадом и возникающие каскады оказываются пространственно разнесены.

Наконец, вторичным мюонам соответствует сигнатура, представленная на Рис. 1.4 (в). Отклик установки состоит, в таком случае, из мюонной траектории

и, для мюонов высоких энергий, ливней, возникающих при взаимодействии мюона с наблюдаемой средой. Нейтринные телескопы могут регистрировать мюоны с энергиями от 10 ГэВ до ультравысоких энергий. Средний угол отклонения вторичного мюона от изначального направления мюонного нейтрино составляет $0.7(E_\nu/TeV)$ [19], поэтому восстановление траектории мюона по сработавшим детекторам телескопа позволяет определить направление первичной частицы.

1.1.1 Излучение Вавилова-Черенкова

Регистрируемое световое поле мюона состоит из двух компонент: свечения продуктов взаимодействия мюона со средой (рождение δ -электронов, e^+e^- -пар, тормозного излучения и фотоядерного взаимодействия) и черенковского свечения самого мюона. Первая составляющая формируется локальными источниками вдоль траектории мюона. Вторая составляющая излучается непрерывно с постоянной линейной плотностью, задаваемой выражением:

$$\frac{dn_C}{d\lambda} = 2\pi\alpha \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \frac{1}{\lambda^2} \quad (1.2)$$

где λ - длина волны фотона (см), α - постоянная тонкой структуры, $n(\lambda)$ - показатель преломления в наблюдаемой среде, β - скорость частицы относительно скорости света в вакууме.

Природа наблюдаемого светового поля мюона объясняется механизмом черенковского излучения. Рассмотрим заряженную частицу, движущуюся в преломляющей свет среде со скоростью $v = \beta c$. Согласно классической электродинамике, такая частица будет источником сферических электромагнитных волн, образованных в результате поляризации электронных оболочек атомов среды [18]. В том случае, если скорость частицы меньше фазовой скорости света в среде (см. Рис. 1.5, а), частица остаётся в пределах волнового фронта. Если же скорость частицы превышает фазовую скорость света в среде (см. Рис. 1.5, б), то порождённые частицей сферические волны образуют конусный фронт с осью, лежащей на траектории частицы, и с углом раствора, определяемым выражением (1.3). Для воды $\theta_C \approx 42^\circ$, для антарктического льда $\theta_C \approx 41^\circ$.

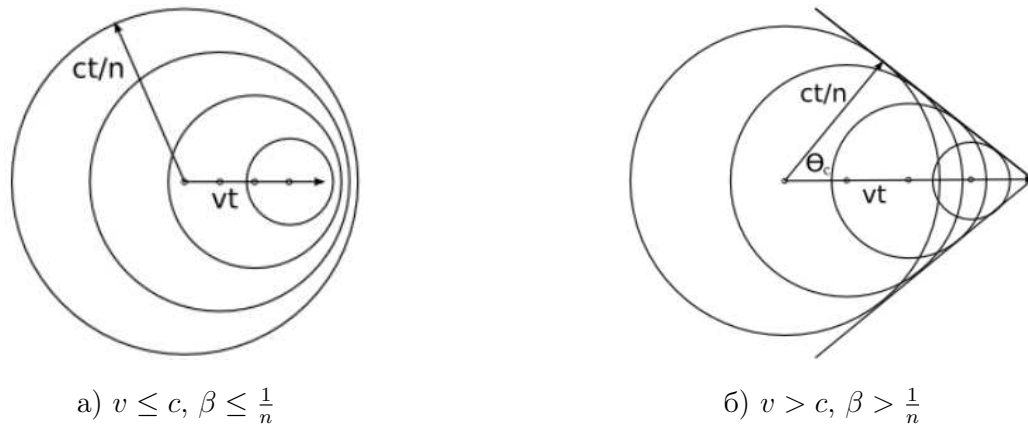
а) $v \leq c, \beta \leq \frac{1}{n}$ б) $v > c, \beta > \frac{1}{n}$

Рисунок 1.5 — Движение заряженной частицы в среде [18]. c - скорость света в вакууме, n - показатель преломления среды

Такой эффект называется свечением Вавилова-Черенкова.

$$\cos\theta_C = \frac{1}{\beta n} \quad (1.3)$$

Спектральное распределение черенковских фотонов задаётся выражением (1.2), скорость черенковских фотонов определяется скоростью распространения света с заданной длиной волны в среде:

$$v_C = \frac{c}{n_g(\lambda)}$$

$$n_g(\lambda) = n(\lambda) - \lambda \frac{dn}{d\lambda}$$

Регистрация черенковского излучения нейтринными телескопами ведётся в интервале длин волн 350-600 нм. Этот диапазон ограничен полглощением света стеклом фотодетекторов и средой, падением интенсивности черенковского излучения.

Потери энергии частицы на черенковское свечение пренебрежимо малы относительно ионизационных потерь [20].

1.1.2 Оптические характеристики наблюдаемых сред

Выбор наблюдаемой среды и конфигурация нейтринного телескопа определяется, исходя из её оптических свойств: показателя поглощения $k(\lambda)$, показателя рассеяния $\sigma(\lambda)$ и индикатрисы рассеяния $\chi(\cos\theta, \lambda)$ (см. Рис. 1.6). В

общем случае, показатель рассеяния влияет на плотность фотодетекторов, а показатель рассеяния на точность восстановления направления оси каскадов.

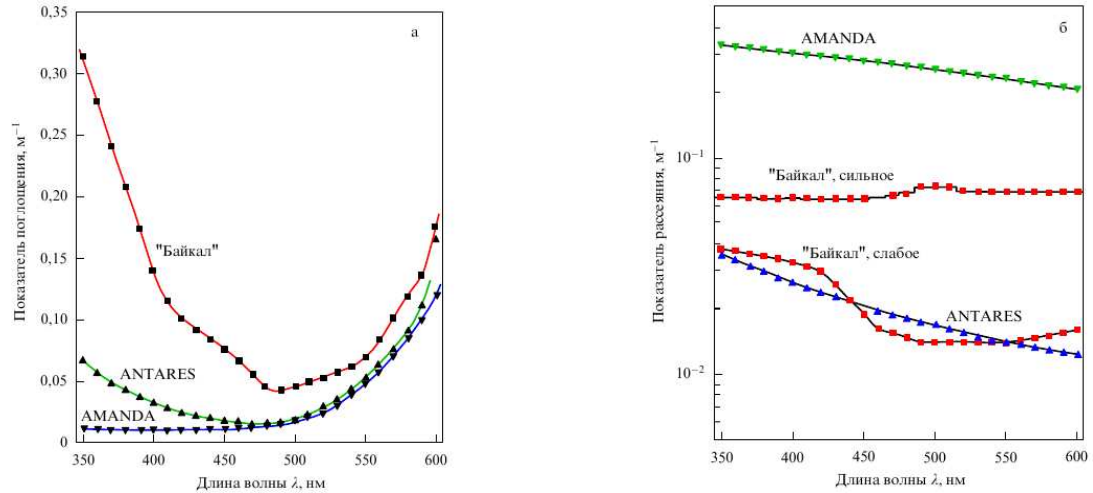


Рисунок 1.6 — Спектральная зависимость показателя поглощения (а) и показателя рассеяния (б) байкальской воды, антарктического льда и воды Средиземного моря

Использование естественных сред вместо искусственных резервуаров позволяет создавать детекторы колоссального объёма с эффективной площадью, достаточной для регистрации нейтрино с энергиями выше 10^9 эВ. Так, объём резервуара SuperKamiokande составляет $22,5 \times 10^3$ м³, в то время как объём нейтринного телескопа IceCube - 1 км³. Нейтринные телескопы обычно глубоко погружены в наблюдаемую среду для подавления фона от космических лучей. Другим преимуществом использования естественных сред является относительная простота увеличения наблюдаемого объёма установки.

В этой главе будет представлен обзор методов регистрации мюонов нейтринных телескопов AMANDA, IceCube, ANTARES и NT-200+. Для этих установок будут описаны общие принципы функционирования систем сбора данных, триггерных систем и принципов обработки набранных данных. Организация детектора Baikal-GVD будет описана отдельно в Главе 2.

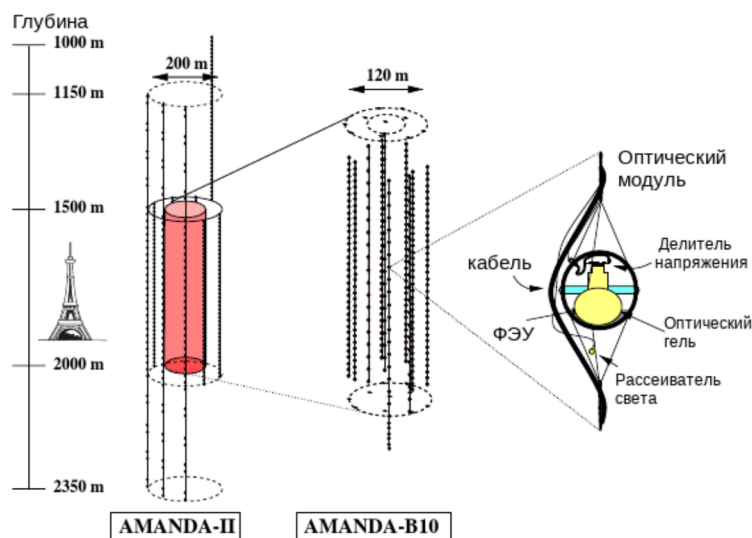


Рисунок 1.7 — Детектор AMANDA-II [19]

1.2 AMANDA

AMANDA (Antarctic Muon And Neutrino Detector Array) - расположенный в Антарктике нейтринный телескоп, работающий с января 2000 года. AMANDA состоит из 677 оптических модулей (ОМ), погруженных в антарктический лёд на глубинах от 1.5 до 2.2 км. Оптический модуль AMANDA - стеклосфера, содержащая 8-дюймовый фотоумножитель (ФЭУ) и управляющую электронику. Модули расположенных на 19 гирляндах, организованных в два concentрических цилиндра (см. Рис. 1.7) с диаметрами 120 и 200 метров. Внутренний цилиндр - запущенный в 1997 году детектор AMANDA-B10 - состоит из 10 гирлянд и 302 ОМ. Гирлянды AMANDA-II вморожены в лёд, извлечь их невозможно.

Аналоговый сигнал с ФЭУ поступает на поверхность в центр управления, где выполняется фильтрация шумов, выделение импульсов и вырабатывается триггер. В AMANDA использовался мажоритарный триггер, т.е. триггер установки вырабатывается в том случае, если во временном окне Δt сработало не менее N модулей [19]. В AMANDA-B10 штатными значениями были $\Delta T = 2\mu s$, $N = 16$, в AMANDA-II $N = 24$. Если триггерное условие выполнено, то для каждого выделенного импульса с ФЭУ определяются и записываются амплитуда, время заднего и переднего фронта.

Время регистрации фотона ОМ должно быть смещено на неизвестную сдвигку t_0 , равную сумме времен прохода сигнала по ФЭУ, оцифровки сигнала

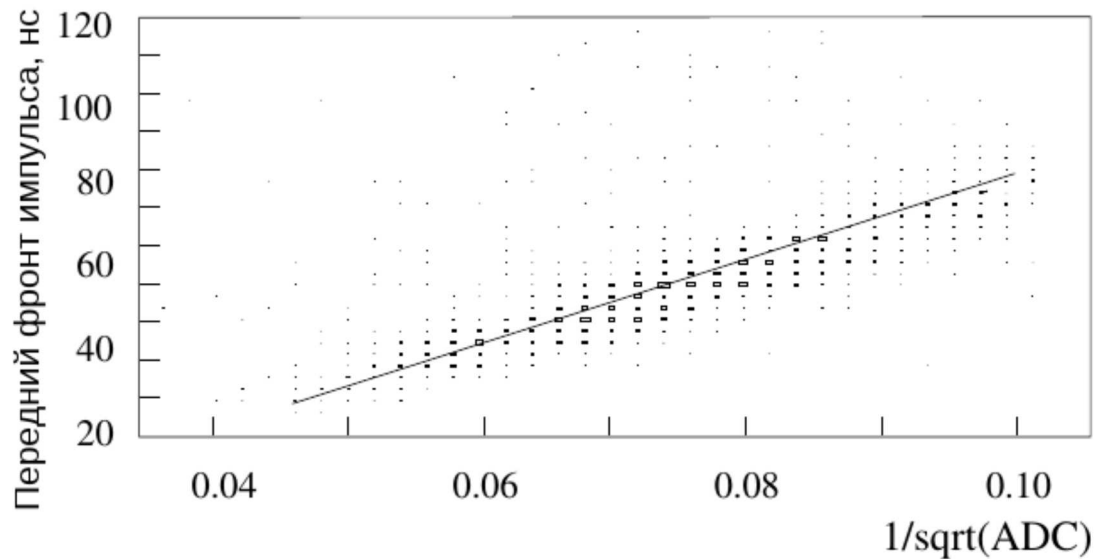


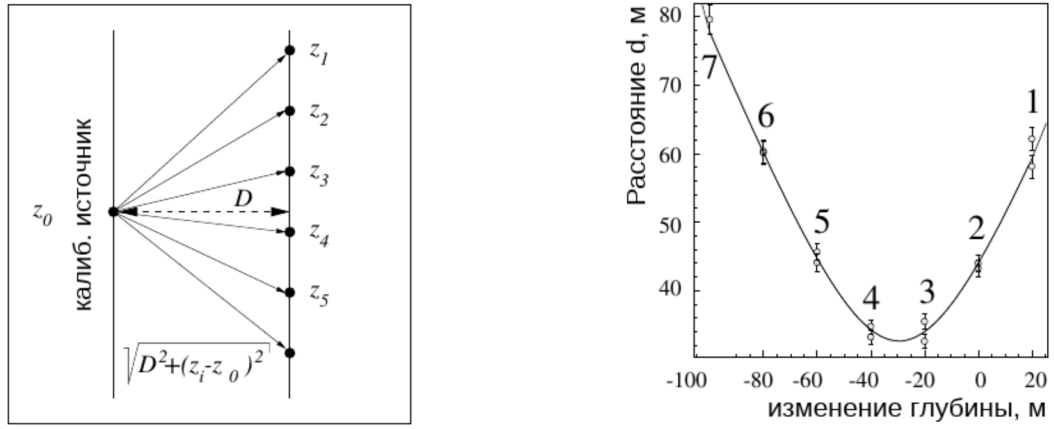
Рисунок 1.8 — Зависимость переднего времени фронта импульса ФЭУ от амплитуды [2]

в АЦП и прохода сигнала до поверхности. Эти сдвиги постоянны для каждого ОМ, их вычисление называется временной калибровкой детектора. В AMANDA для временной калибровки используются 4 компонента [2; 21]:

1. **Светодиодные матрицы.** Могут работать как в импульсном режиме (частота 500 Гц, продолжительность импульса 7 нс, амплитуда импульса 10^6 фотонов), так и в режиме постоянного тока ($10^{14} - 10^{15}$ фотонов в секунду). Длина волны: 450 нм.
2. **Азотные лазеры.** Расположены на глубинах 1300-2300 м. Длина волны - 337 нм, продолжительность импульса - 1 нс, максимальная интенсивность импульса составляет 10^{10} фотонов.
3. **Галогенные лампы.**
4. **Поверхностный Nd:YAG лазер.** Лазерный источник соединён оптоволоконном с рассеивателями, расположенными в оптических модулях установки. Диапазон длин волн этого источника составляет 450-600 нм, временной разрешение для 530 нм равно 15 нс.

Эти компоненты также используются для определения оптических свойств наблюдаемого льда.

Для того, чтобы определить t_0 , выполняются измерения разностей времён генерации импульса источником света (поверхностным Nd:YAG лазером) и срабатывания ОМ. Время, которое требуется свету, чтобы дойти от источника до ОМ, определяется заранее с помощью оптического рефлектометра и



а) Предполагаемая геометрия установки. б) Интерполяция $d(z_i)$ от сдвижки $z_i - z_0$.

Рисунок 1.9 — Определение координат ОМ в AMANDA [2]

вычитается из полученных измерений. Таким образом, время прихода фотона на фотокатод определяется выражением:

$$t = t_{LE} - t_0 + \frac{\alpha}{\sqrt{ADC}} \quad (1.4)$$

Здесь, t_{LE} - время переднего фронта пришедшего на поверхность импульса, ADC - амплитуда сигнала, α - постоянная величина. Поправка $\frac{\alpha}{\sqrt{ADC}}$ объясняется зависимостью времени фронта сигнала от амплитуды, возникающей в результате прохода сигнала по ~ 2000 м. кабеля. Оценка временной сдвижки t_0 и коэффициента α определяется из распределений, аналогичных представленному на Рис. 1.8

После калибровки, временное разрешение установки составляет 5 нс для AMANDA-B10 и 3.5 нс для остальных гирлянд установки [19].

Помимо калибровки лазерным источником, в AMANDA также выполняется калибровка с помощью атмосферных мюонов. Подробнее этот метод калибровки будет описан в Главе 5.

Координаты ОМ установки также определяются с помощью калибровочных источников света, а именно лазеров и светодиодных матриц. Для каждого калибровочного источника по времени пролёта фотонов вычисляется расстояние до оптических модулей, зарегистрировавших его сигнал. Из-за рассеяния света в антарктическом льду, на каждый импульс источника приходится относительно небольшое количество ОМ, для которых можно определить время пролёта с достаточной точностью. Предполагается, что гирлянды установки вертикальны и параллельны друг другу, а ОМ расположены строго через 20 м.

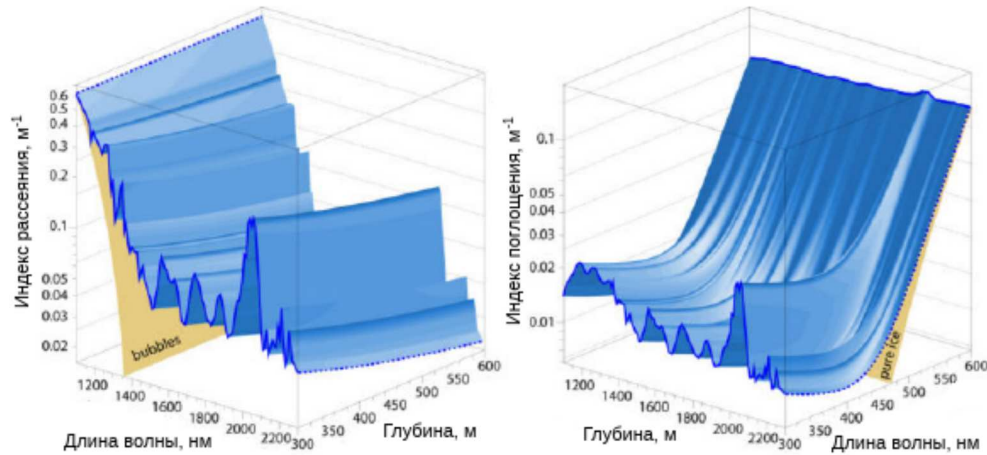


Рисунок 1.10 — Индекс рассеяния и поглощения антарктического льда [18]

друг от друга (см. Рис. 1.9, а)). Расстояние между ОМ, лежащим на глубине z_i , и источником, лежащим на глубине z_0 , можно записать как:

$$d(z_i) = \sqrt{D^2 + (z_i - z_0)^2} \quad (1.5)$$

где D - расстояние между гирляндами источника и ОМ. Расстояние между гирляндами и относительную глубину модулей $z_0 - z_j$ можно определить по результатам интерполяции зависимости $d(z_i)$ от $z_i - z_j$ (см. Рис. 1.9, б)). Абсолютные координаты ОМ определяются по определённым вышеприведённым методом относительным координатам и записям координат буровой головки, выполнявшей бурение скважины гирлянды.

Длина поглощения в антарктическом льду составляет в среднем 110 м. для $\lambda = 400$ нм и сильно меняется с длиной волны. Длина ослабления определяется выражением $\frac{l_s}{1 - \langle \cos \theta_s \rangle}$, где l_s - длина рассеяния, а θ_s - угол рассеяния. Для $\lambda = 400$ нм средняя длина ослабления составляет 20 м. В силу различных условий образования ледяного покрова Антарктиды, антарктический лёд крайне неоднороден (см. Рис 1.10). На глубинах 1.5-2 км (на уровне AMANDA-II) длина поглощения меняется от 30 до 150 метров, а длина рассеяния от 0.4 до 4 метров. Малая длина рассеяния в антарктическом льду в совокупности с большой длиной поглощения означает изотропизацию источников, что ведёт к низкой точности восстановления оси каскадов.

Обработка данных в AMANDA выполняется с помощью пакета PAW, а также библиотек SiEGMuND и rdmc [22]. Последовательность обработки дан-

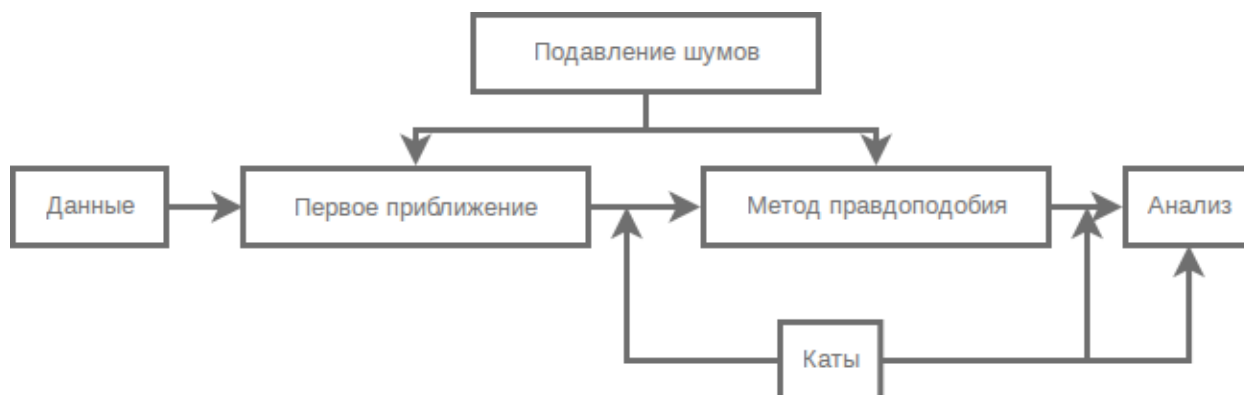


Рисунок 1.11 — Последовательность обработки данных в AMANDA [19]

ных в AMANDA представлена на Рис. 1.11 и состоит из трёх этапов. На первом этапе выполняется подавление шумов и выработка первого приближения траектории. На втором этапе осуществляется восстановление траектории методом наибольшего правдоподобия. В AMANDA использовались несколько функции правдоподобия по временам срабатывания ОМ, по вероятностям срабатывания ОМ и т. д. На последнем этапе формируется Data Summary Tape, обычно в форме RAW-кортежей. После каждого этапа обработки возможна дополнительная фильтрация импульсов (каты).

Одним из преимуществ AMANDA является низкий шумовой фон - антарктический лёд не светится, а темновые шумы используемых ФЭУ не больше 1 кГц. При восстановлении, времена шумовых импульсов дают наибольшие остаточные значения для функции правдоподобия и отбрасываются. Атмосферные мюоны достаточно хорошо восстанавливаются [19] и фильтруются по зенитному углу.

1.3 IceCube

IceCube [3; 23–26] - это кубокилометровый нейтринный телескоп, расположенный на Южном Полюсе. Он состоит из 5160 смотрящих вниз ОМ, расположенных на 86 гирляндах на глубинах 1450-2450 м в толще льда. Каждая гирлянда содержит 60 оптических модулей, расположенных на расстоянии 17 метров друг от друга. IceCube расположен на месте детектора AMANDA (см. Рис. 1.12) и заменяет его.

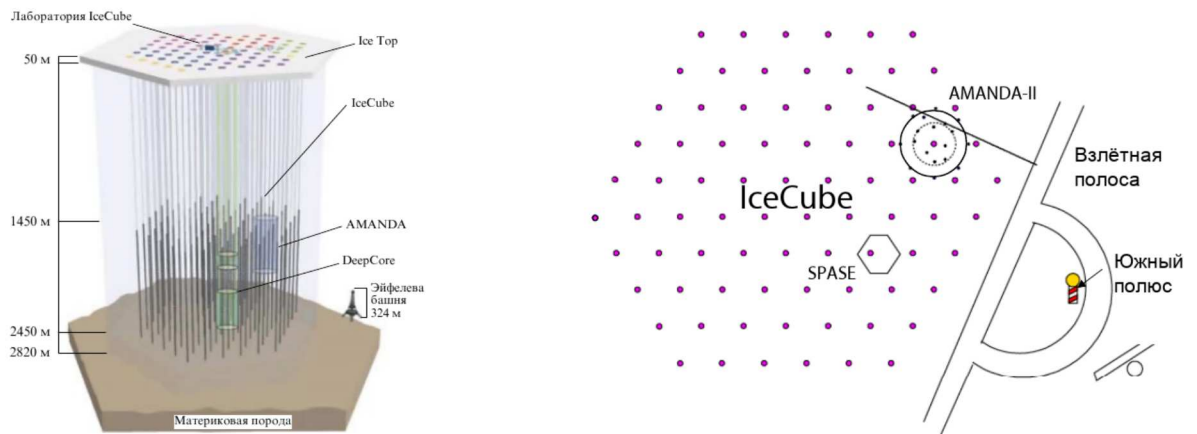


Рисунок 1.12 — Структура IceCube [3; 23]

На поверхности ледяного покрова, прямо над детектором IceCube, расположена установка IceTop, состоящая из 320 ОМ и предназначенная для регистрации атмосферных частиц для дальнейшей фильтрации. IceCube также содержит DeepCore [27; 28] - нейтринный телескоп с большей плотностью оптических модулей, чем IceCube и объёмом около 10^7 м³. Увеличение плотности ОМ в DeepCore достигается за счёт установки шести дополнительных 72 метровых гирлянд с меньшим межмодульным расстоянием, чем на остальных гирляндах IceCube. DeepCore предназначен для исследования нейтринных осцилляций и поиска продуктов аннигиляции кандидатов на роль частиц темной материи. Энергетический порог DeepCore составляет 10 ГэВ. В планах IceCube также входит интеграция детектора PINGU (Precision IceCube Next Generation Upgrade) с порогом регистрации 1 ГэВ и эффективным объёмом 1-10 Мт.

Поскольку IceCube расположен в той же среде, что и AMANDA, он обладает теми же ограничениями и преимуществами в том что касается длины распространения и поглощения света.

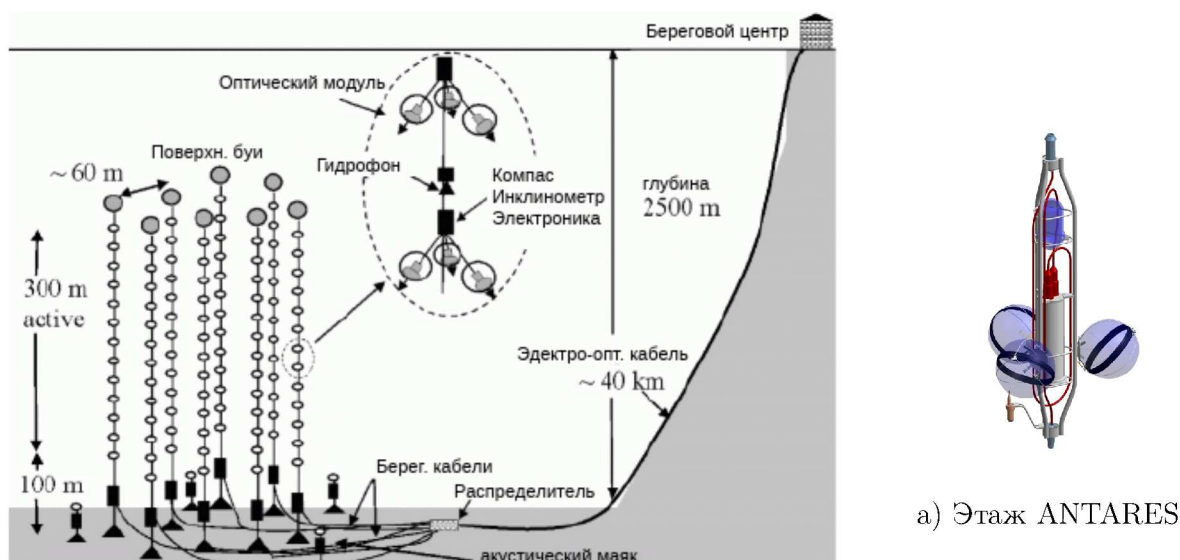
В отличие от AMANDA, оптические модули IceCube содержат АЦП и самостоятельно выполняют оцифровку сигнала ФЭУ [29; 30]. Поэтому модули IceCube называются цифровыми оптическими модулями (ЦОМ). Тем не менее, временная калибровка ЦОМ всё равно необходима. Каждый ЦОМ оборудован 12 светодиодными источниками. Они используются для светодиодной временной калибровки. В Baikal-GVD используется аналогичная процедура, которая будет описана в Главе 3. Временная калибровка также выполняется с помощью околоразвертикальных атмосферных мюонов.

Амплитудная калибровка также выполняется с помощью встроенных светодиодов. Во время амплитудной калибровки светодиоды ЦОМ включаются с фиксированным периодом, АЦП ЦОМ набирает гистограмму амплитуд откликов ФЭУ. Положение однофотозлектронного пика на фите гистограммы позволяет определить амплитудные калибровочные коэффициенты. Эта процедура повторяется для разных значений HV модуля, пока не будет получено усиление сигнала ФЭУ в 10^7 .

Одним из преимуществ антарктического льда является низкий уровень шума. Шумовой темп счёта ОМ IceCube составляет < 0.5 кГц (в AMANDA - 1 кГц). Такой шум легко подавляется условием совпадения соседних ЦОМ.

В IceCube используются несколько триггерных условий [31]. Наиболее часто используется условие, при котором 8 ЦОМ срабатывают во временном окне продолжительностью 5 микросекунд с локальными совпадениями. Этот триггер собирает большинство нейтринных событий. В 2008 году был добавлен ещё один, гирляндный, триггер. Гирляндный триггер вырабатывается тогда, когда во временном окне длиной $1.5 \mu\text{s}$ срабатывает 5 из 7 смежных ЦОМ. Такой триггер обладает повышенной чувствительностью к низкоэнергетическим событиям, и особенно восходящим мюонам. При выработке триггера все импульсы в пределах 10 микросекунд от времени выработки сохраняются как единое событие. Если один триггер срабатывает во временном окне другого, то пишется объединённое событие.

Обработка данных в IceCube выполняется в специально разработанном программном пакете IceTray [32]. Модульная структура IceTray позволяет реализовывать большое количество различных методов восстановления и выделения событий. Стандартный подход восстановления мюонных траекторий в IceCube - оптимизация функционала правдоподобия по предполагаемой геометрии события. Первое приближение для мюонных траекторий берётся в форме движущегося со скоростью света плоского фронта, либо строится на основе зарядов сигналов сработавших ЦОМ. В сам функционал правдоподобия включаются результаты моделирования распространения света в антарктическом льду, из которых получается вероятность того, что черенковский фотон, излучённый из заданной траектории, достигнет заданный ЦОМ. Значение вероятности учитывает положение и ориентацию ЦОМ, а также свойства среды.



а) Схема детектора ANTARES

Рисунок 1.13 — Детектор ANTARES [16]

1.4 ANTARES

ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch) - построенный в 2008 году глубоководный нейтринный телескоп. Он расположен в Средиземном море в 40 км от побережья Франции. ANTARES состоит из 900 ОМ, расположенных на 12 гирляндах на глубине 1.9-2.3 км. Расположение гирлянд представлено на Рис. 1.13.

В ANTARES модули представляют собой глубоководные стеклосферы диаметром 43 см, содержащие 10-дюймовый ФЭУ и электронику, обеспечивающую его питание. ОМ организованы в “этажи” (см. Рис 1.13, б)), каждый этаж содержит 3 модуля. ОМ на каждом этаже направлены вниз, под углом 45 градусов к вертикали. Этаж крепится на гирлянду с помощью титановой рамы, к которой также крепится светодиодный калибровочный источник, гидрофон и локальный управляющий модуль (ЛМ).

Группа из 5 этажей формирует “сектор” - единицу системы сбора данных ANTARES. На каждой гирлянде детектора расположено 5 секторов, всего в установке их 300. Каждый сектор содержит мастерный управляющий модуль, который отвечает за сбор данных с этажей сектора и их отправку на береговую станцию. Расстояние между соседними этажами - 14.5 метров.



Рисунок 1.14 — Оптический модуль ANTARES [16]

В ANTARES каждому сигналу ОМ соответствует временная метка, представляемая локальным модулем. Часы локального модуля синхронизируются с берегом с частотой 20 МГц по оптоволоконной сети. Между часами различным ЛМ существуют сдвигки, возникающие вследствие разброса длин оптических путей, по которым осуществляется синхронизация. Эти сдвигки определяются по задержке прохода сигнала синхронизации от берега до ЛМ и обратно. Абсолютные времена срабатываний ОМ определяются благодаря синхронизации береговых часов с GPS.

Оцифровка сигнала ФЭУ выполняется ARS-чипом (Analogue Ring Sampler - аналоговый кольцевой оцифровщик) локального модуля при превышении амплитудного порога (обычно, 0.3 ф.э.). В целях экономии пропускной способности канала, для большинства сигналов ЛМ выделяет только значение заряда и временную метку (с разрешением 0.2 нс). Однако, если у сигнала большая амплитуда или форма сигнала похожа на двойной импульс, то высылается весь кадр. Такой подход приводит к тому, что ARS во время оцифровки недоступен ФЭУ. Поэтому в каждом ЛМ находится два ARS-чипа которые по очереди выполняют оцифровку сигнала ФЭУ.

Кроме сдвижек часов этажей, на временную метку сигнала влияет временная сдвигка t_{PMT} , которое проходит с момента прихода фотона до срабатывания ФЭУ. Значение t_{PMT} можно определить с помощью калибровочного светодиода, расположенного в ОМ ANTARES. Поскольку и время срабатывания светодиода и время регистрации его сигнала ФЭУ обрабатываются ARS, сдвигку ФЭУ можно легко определить. Помимо калибровочных светодиодов для временной калибровки в ANTARES используются внешние лазерные источники и светодиодные матрицы аналогично AMANDA.

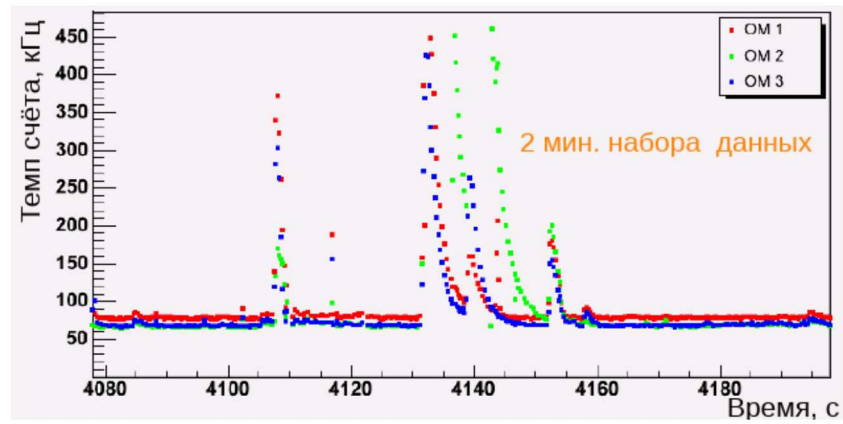


Рисунок 1.15 — Краткосрочные колебания фоновых шумов в ANTARES [33]

В отличие от IceCube и AMANDA, гирлянды ANTARES - гибкие, и положение ОМ меняется со временем. В силу этого, определение координат ОМ должно выполняться регулярно. Для этих целей в этажах ANTARES установлены компасы и инклинометры, позволяющие определить ориентацию этажа. Кроме того, каждый пятый этаж оборудован гидрофоном, что позволяет получить координаты этажа относительно ультразвуковых эмиттеров, расположенных у якорей установки. Такой подход позволяет определить относительные координаты и геометрическое положение каждого этажа детектора. Абсолютные координаты вычисляются на основе данных акустического позиционирования и замеров, сделанных при установке гирлянд.

Данные о заряде и временах зарегистрированных импульсов, собранные ЛМ, отправляются на мастерный управляющий модуль, откуда они пересылаются на берег. Благодаря высокой пропускной способности канала, соединяющего ANTARES с берегом, такой подход снимает необходимость в аппаратном триггере.

В ANTARES используются 2 механизма восстановления мюонных траекторий [4]. Первый подход подразумевает использование откликов с низким содержанием шума и основан на минимизации χ^2 по временам срабатываний ФЭУ относительно модели одиночного мюона. В этом подходе игнорируется ориентация этажей установки. Он был изначально разработан для on-line восстановления событий с угловым разрешением 1-2 градуса для 10 ТэВ. Вторым подходом является оптимизация полноценного функционала правдоподобия, которые использует параметризацию распределений остаточных значений отклика траектории, полученную на основе моделирования. Этот функционал также учитывает сдвигку времён прихода фотонов, связанную с рассеянием света

и черенковского свечения вторичных частиц. Угловое разрешение при таком подходе не хуже 0.3° для энергий выше 10 ТэВ.

В 2006-2010 гг. коллаборации ANTARES, NEMO (NEutrino Mediterranean Observatory) [14; 34] и NESTOR (Neutrino Extended Submarine Telescope with Oceanographic Research) [15; 35] создали концепцию нового средиземноморского детектора KM3Net, призванного заменить старые установки [36–38]. В завершённом виде KM3Net будет состоять из 6 независимых блоков с общим объёмом 3-5 km^3 .

1.5 NT-200

В 1998 году был запущен первый в мире глубоководный нейтринный телескоп NT-200 [1; 39; 40]. Телескоп располагается в оз. Байкал на глубине ~ 1 км. в 3.5 км. от берега и наблюдает 100 кт озёрной воды. NT-200 был запущен в 1998 году и стал первой установкой, на которой был успешно реализован метод регистрации нейтрино, описанный в пункте 1.1.

NT-200 состоит из 192 ОМ, расположенных на восьми гирляндах длиной 72 метра (см. Рис. 1.16, а)). Гирлянды установки расположены в вершинах и центре правильного семиугольника с диаметром 43 м. На каждой гирлянде расположено 24 ОМ. Оптические модули крепятся на гирлянду парами, пара модулей работает как единый регистрирующий канал установки (см. Рис. 1.16, а)). Пары ОМ расположены на гирлянде с шагом 6.25 м. Каждый ОМ содержит ФЭУ КВАЗАР диаметром 37 см, разработанный специально для этого детектора [42]. ФЭУ второго и одиннадцатого канала гирлянды направлены вверх, все остальные направлены вниз. Гирлянды крепятся на жёстком зонтичном каркасе.

В 2005 году NT-200 был дополнен тремя внешними гирляндами, расположенными в 100 м от центра установки (см. Рис 1.16, б)). Длина внешних гирлянд - 200 м, на каждой гирлянде расположено 6 каналов. Все каналы, кроме двух нижних каналов на каждой гирлянде, направлены вниз. Такая конфигурация повысила чувствительность NT-200 к нейтрино высоких энергий в 4 раза. Усовершенствованная установка получила название NT-200+.

Каналы НТ-200 работают в режиме совпадений - канал считается сработавшим, если амплитуда сигнала ФЭУ на обоих ОМ канала превысила 3 ф.э. в пределах заданного временного окна. Этот подход предназначен для подавления шумов от темнового тока ФЭУ и хемилюминисценции осаждающейся органики. Сработавшему каналу соответствуют время и амплитуда зарегистрированного на нём сигнала. За время сигнала принимается самое раннее время срабатывания ОМ пары, за амплитуду - амплитуда сигнала на заранее выбранном ОМ пары. В случае отказа одного из оптических модулей пары канала, канал может работать с одним ОМ и более высоким значением порога регистрации. Условием работы канала в таком режиме служит низкий темп счёта шумов рабочего ОМ канала (меньше среднего значения 100 кГц).

На уровне установки подавление шумов и выделение событий выполняется триггерной системой. Триггер НТ-200 формируется в том случае, если в течение 500 нс сработало более N каналов. Обычно N берётся равным 3 или 4. После формирования триггера амплитуды и времена сработавших каналов оцифровываются и пересылаются на берег.

Временная калибровка НТ-200 выполняется с помощью двух азотных лазеров. Первый лазер расположен в центре кластера на глубине 20м, его оптический сигнал передаётся на ОМ установки по оптоволокну. Временные сдвиги каналов определяются по разностям времён срабатывания лазера и регистрации сигнала ОМ. Эта процедура аналогична лазерной калибровке в AMANDA, описанной в пункте 1.2. Второй лазер расположен на отдельной гирлянде (см. Рис 1.16, б)), на 20 м. ниже детектора. Он может работать в 5 режимах с различной интенсивностью. Этот лазер используется в качестве искусственного источника, аналогичного высокоэнергетическому ($E \sim 1$ ПэВ) каскаду, возникшему за пределами внутреннего объёма НТ-200. Он также применяется для временной калибровки НТ-200+.

Длина поглощения света в Байкале составляет 20-25 м, а длина рассеяния - 30-50 м (см. Рис. 1.6).

При темпе счёта шумов ОМ ~ 100 кГц, шумовой темп счёта пары ОМ, работающих с совпадением в окне 15 нс, всё равно заметен. В НТ-200 для off-line подавления шумов используется принцип причинности: разность времён срабатывания каналов должна быть меньше времени распространения света между каналами [43]:

$$|\Delta t_{ij}| < \frac{r_{ij}}{c_n} + \delta \quad (1.6)$$

Здесь, r_{ij} - расстояние между ОМ, c_n - скорость света в среде, δ - коэффициент, введённый для компенсации временного джиттера. При попарном переборе сработавших каналов установки каналы, нарушающие условие 1.6 в большом количестве случаев, считаются шумовыми и исключаются из события. В Baikal-GVD принцип причинности также используется для подавления шумов, он будет подробнее описан в главе 4.

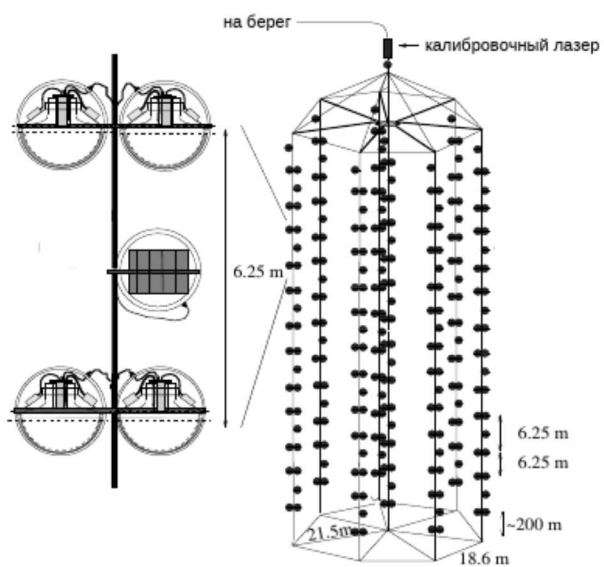
В НТ-200 использовался ещё один способ подавления шумов, рассчитанный на выделение одиночных мюонов. Он основан на том, что в модели одиночного мюона для некоторой разности времён срабатываний каналов $\Delta t_{i,j}$ определены граничные значения зенитных углов мюонной траектории θ_{min} и θ_{max} . Диапазон допустимых зенитных углов для пар каналов, засвеченных одним мюоном, должен перекрываться. Каналы, нарушающие это условие, считаются шумовыми.

Эффективность описанных методов подавления шумов была определена на основе результатов моделирования атмосферных мюонов. В 70% событий не оказалось каналов, нарушающих хотя бы одно из вышеперчисленных условий. В остальных случаях из событий исключалось в среднем 2 канала.

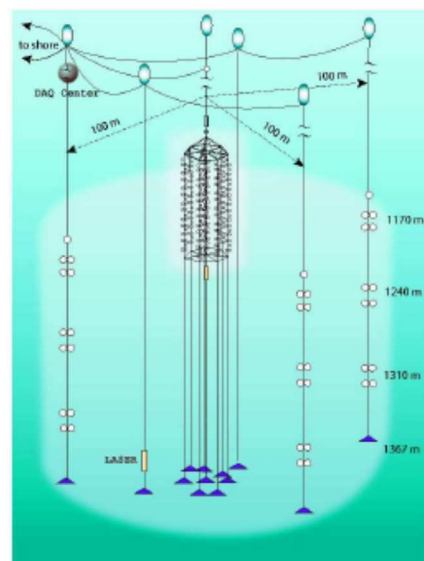
Восстановление мюонных траекторий в НТ-200 выполнялось на основе минимизации χ^2 по временам срабатываний каналов:

$$\chi_t^2 = \sum_{i=1}^{N_{hit}} \left(\frac{T_i(\mu) - t_i}{\sigma_{t_i}} \right)^2 \quad (1.7)$$

Здесь, t_i - измеренное время срабатывания канала, $T_i(\mu)$ - ожидаемое время срабатывания канала для заданной параметризации мюонной траектории μ . Такой подход применим только в том случае, если в отклике не менее 5 сработавших каналов на 3 гирляндах. Однако, особенности поведения функционала 1.7, а также возможность оценки качества восстановления по остаточным значениям χ_t^2 приводят к тому, что для восстановления отбираются события с не менее чем 6 сработавшими каналами на 3 гирляндах (триггер 3/6). Для аппаратного триггера установки с $N = 4$ такие события составляют $\sim 30\%$ от полного числа событий. Алгоритм восстановления мюонных траекторий Baikal-GVD унаследован от НТ-200 и будет подробнее описан в Главе 5.



а) Схема NT-200 [41]



а) Схема NT-200+

Рисунок 1.16 — Детектор NT200+

Глава 2. Глубоководный нейтринный детектор Baikal-GVD

Байкальская нейтринная обсерватория (БНО) [44–54] размещена в южной части озера Байкал. Географические координаты места расположения БНО $51^{\circ}50'$ с.ш., $104^{\circ}20'$ в.д. Глубина озера в этом районе составляет 1300–1400 метров на расстоянии 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. Расположение БНО на оз. Байкал и рельеф дна озера в месте дислокации установки показаны на рисунке 2.1

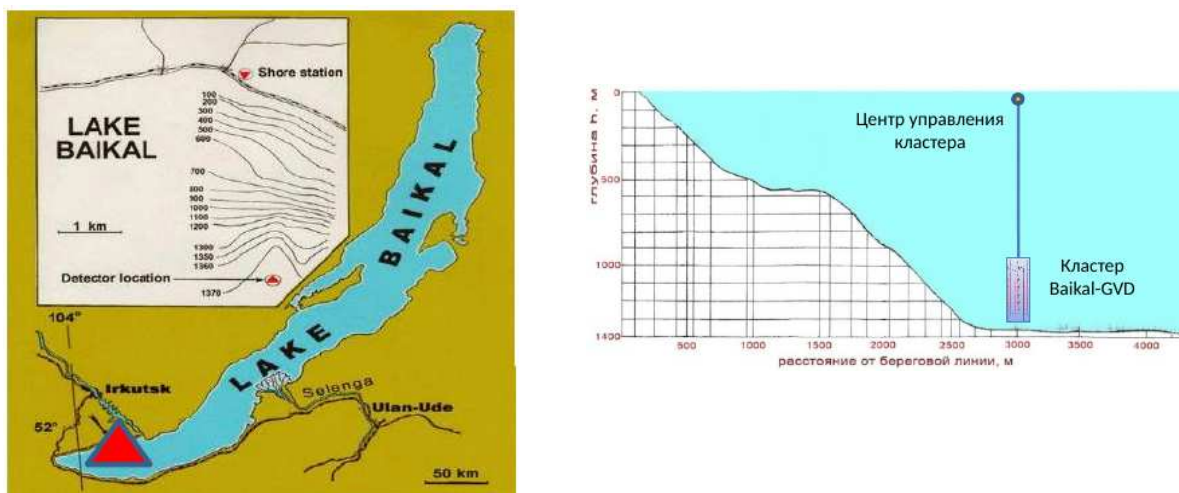


Рисунок 2.1 — Расположение БНО на оз. Байкал и рельеф дна озера в месте дислокации установки.

Помимо наличия значительных глубин озера Байкал в районе расположения установки, место дислокации нейтринного телескопа имеет ряд дополнительных преимуществ, связанных как со свойствами среды регистрации излучения, так и с возможностями монтажа детектора. 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, используя его как прочную и неподвижную монтажную платформу. Сроки безопасного ведения работ обычно превышают 8 недель.

Вода оз. Байкал характеризуется высокой степенью прозрачности: длина поглощения света составляет величину 22 ± 2 м. Длина рассеяния света в зави-

симости от сезона варьируется в диапазоне 30 – 50 м [6]. Свечение байкальской воды определяется главным образом хемилюминесценцией, возникающей при окислении мелкой органической взвеси, растворенной в воде. Свечение носит однофотонный характер, в нем отсутствуют многофотонные вспышки света. Средний поток фотонов на глубинах ~ 1000 м составляет $\sim 2 \times 10^2$ фотонов $\text{сек}^{-1} \text{см}^{-2}$. В осенний период свечение воды усиливается. Особенности места размещения нейтринного телескопа Baikal-GVD в значительной степени определяют его конструкцию и конфигурацию регистрирующей системы.

2.1 Конструкция нейтринного телескопа

Тип конструкции Baikal-GVD обусловлен главным образом свойствами среды (длиной поглощения и рассеянием света, а также уровнем фонового свечения), способом разворачивания детектора (использование ледяного покрова для монтажа установки) и возможностью модификации конфигурации регистрирующих систем. Для обеспечения эффективного разворачивания установки со льда оз. Байкал, элементы регистрирующей системы детектора крепятся на вертикальные кабель-тросы, формируя так называемые *гирлянды*. Гирлянды фиксируются на дне озера при помощи якорей, а их вертикальную ориентацию обеспечивают кухтыли – система “поплавков”, закрепленных на кабель-тросе в верхней части гирлянды.

В гирляндах используется два типа несущих тросов. Нержавеющий трос продолжается первые 350 метров от дна озера, на нём закреплен якорь гирлянды, регистрирующие и управляющие элементы гирлянды. Кабель-трос с пластиковой изоляцией крепится к нержавеющей трубе на глубине около 1 км и идёт к поверхности. На кабель-тросе фиксируются кухтыли; по нему также осуществляется связь с электронными компонентами гирлянды.

Гирлянды объединяются в кластеры – функционально законченные детекторы, способные работать как в составе полномасштабной установки, так и в автономном режиме. Каждый кластер связан с береговым центром сбора данных гибридным оптоволоконным кабелем длиной около 6 км для обеспечения его электропитания и передачи информации. Модульная структура Baikal-GVD позволяет проводить набор экспериментальных данных уже на ранних стадиях

развертывания установки. Конструкция кластера Baikal-GVD представлена на Рис. 2.2.

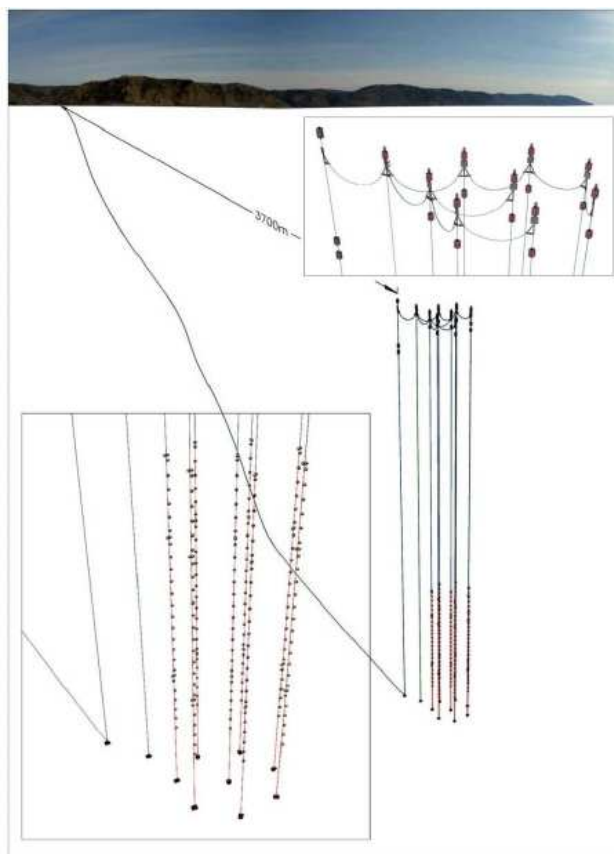


Рисунок 2.2 — Кластер Baikal-GVD, сформированный из 8 гирлянд.

Для защиты от гидростатического давления фотодетекторы и блоки электроники установки, установленные на гирляндах, помещаются в глубоководные сферические корпуса из боросиликатного стекла диаметром 42 см (корпус VITROVEX производства фирмы Nautilus Marine Service GmbH), формируя *глубоководные модули*. На корпус глубоководных модулей устанавливаются глубоководные разъемы и вакуумный порт. Через вакуумный порт производится откачка воздуха до давления $\sim 0,7$ атм., достаточного для надежной фиксации двух полусфер корпуса между собой. Крепление глубоководных модулей на кабель-тросе осуществляется при помощи специальных рам (см. Рис. 2.3).

Количество разнотипных глубоководных модулей на гирлянде минимизировано. Основное количество ($\sim 90\%$) составляют оптические модули (ОМ), содержащие фотодетекторы. Оптические модули гирлянды объединяются в группы по 12 ОМ (секции). Расстояние между ОМ на гирлянде составляет 15 метров. Управление работой оптических модулей обеспечивают центральные модули секций (ЦМ), в состав которых входят аналого-цифровые преобразователи



Рисунок 2.3 — Крепление глубоководного модуля на нержавеющей кабель-трос с помощью *рамы*.

и система обработки и передачи данных. Данные с ЦМ секций поступают в модуль гирлянды (МГ), который транслирует их в центр сбора данных кластера (ЦК).

Глубоководные модули гирлянды связаны между собой кабельными коммуникациями, закрепленными на кабель-тросе. Кабели, соединяющие ОМ и ЦМ стандартизованы и имеют одинаковую длину ~ 90 метров не зависимо от места размещения оптического модуля. Длины кабелей для связи между ЦМ и МГ (накладных кабелей) определяются местом расположения секции и составляют величину ~ 100 и ~ 300 метров. Для связи между МГ и ЦК используется грузонесущий кабель длиной ~ 1 км. Для подключения кабелей к глубоководным модулям используются разъемы фирмы SUBCONN с 5 и 9 контактами (LPIL5M и LPIL9M). Эти разъемы обладают высокой степенью надежности и обеспечивают возможность “мокрого” соединения (т.е. допускается подключение разъема под водой). Все кабельные коммуникации имеют продольную герметизацию. Они изготавливаются по специальному заказу в фирме “Псковгеокабель” для байкальского проекта.

Гирлянды подключаются к центру сбора данных кластера (ЦК) при помощи кабельных перемычек длиной около 60 метров. В состав ЦК входят три специализированных глубоководных модуля, обеспечивающих управления электропитанием кластера, прием и передачу данных и формирование общего триггера. Глубоководные модули ЦК крепятся на специальный подводный щит (см

Рис. 2.4). Центр кластера связан с Береговым центром сбора данных гибридным оптическим кабелем.



Рисунок 2.4 — Фотография глубоководных модулей центра кластера.

Первый кластер Ваика-GVD был введен в эксплуатацию в апреле 2015 года. Схематический вид кластера показан на Рис. 2.5

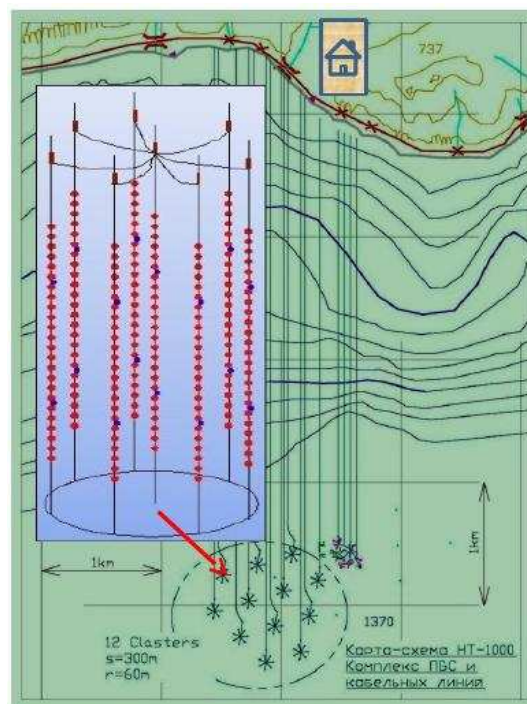


Рисунок 2.5 — Схема кластера, установленного в оз. Байкал в 2015 году, и планируемая конфигурация детектора Ваикаl-GVD.

Кластер 2015 года включал в свой состав 8 гирлянд оптических модулей. Радиус кластера 40 метров, высота кластера (длина гирлянд) 345 метров, общее количество фотодетекторов (оптических модулей) 192. Расстояние от верхних ОМ до поверхности озера около 1 км. В 2016 году радиус кластера был увеличен до 60 м, высота кластера до 550 м, а количество ОМ до 288. В состав полномасштабной установки Baikal-GVD будет входить 12 кластеров (см. Рис. 2.5).

2.2 Система регистрации и сбора данных Baikal-GVD

Функциями системы регистрации и сбора данных Baikal-GVD [55] являются:

1. Регистрация черенковского излучения от заряженных частиц в рабочем объеме детектора и формирование электрических сигналов, адаптированных для их дальнейшей обработки с целью определения времени регистрации и интенсивности излучения.
2. Преобразование электрических сигналов в цифровой вид и формирование блоков данных для их последующей передачи в центр сбора данных установки.
3. Формирование триггера установки, обеспечивающего выделение физических событий (событий, обусловленных регистрацией черенковского излучения) из фона, обусловленного свечением воды оз. Байкал.
4. Передача физической информации в центр сбора данных установки и команд управления режимами работы в электронные системы детектора.
5. Контроль работы всех узлов установки и мониторинг фоновых условий регистрации детектора.

Перечисленные выше функции распределены между основными структурными единицами системы регистрации и сбора данных: оптическими модулями, а также модулями электроники секции, гирлянды и центра кластера. Каждый из перечисленных модулей формирует на выходе пакеты данных трех типов:

- Статусная информация, характеризующая конфигурацию и режим работы модуля.

- Мониторная информация, содержащая данные о состоянии самого модуля и условий его работы.
- Физические данные, формируемые при регистрации детектором черенковского излучения от заряженных частиц или световых вспышек от калибровочных источников света (светодиодов и лазера).

2.2.1 Оптический модуль Baikal-GVD

Основой регистрирующей системы Baikal-GVD являются оптические модули (ОМ) [56], оснащенные фотоэлектронными умножителями R7081-100 (ФЭУ) с полусферическими фотокатодами диаметром 25 см и квантовой эффективностью 32 - 34%. ФЭУ регистрируют черенковское излучение, генерируемое в воде заряженными релятивистскими частицами. На основании информации, полученной от группы оптических модулей, зарегистрировавших излучение, можно восстановить тип события и энергию частиц. Общий вид оптического модуля представлен на Рис. 2.6.

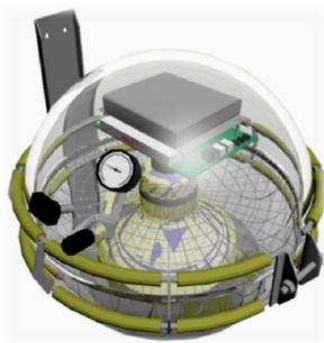


Рисунок 2.6 — Общий вид оптического модуля.

Фотоэлектронный умножитель размещается в стеклянном глубоководном корпусе VITROVEX. Крепление ФЭУ осуществляется при помощи двухкомпонентного силиконового геля, который обеспечивает оптический контакт между фотокатодом и стеклом корпуса. Для уменьшения влияния магнитного поля Земли на работу ФЭУ он защищен экраном из отожженного пермаллоя. Блок электроники оптического модуля монтируется непосредственно на цоколь ФЭУ. Функциональная схема электроники ОМ представлена на Рис. 2.7.

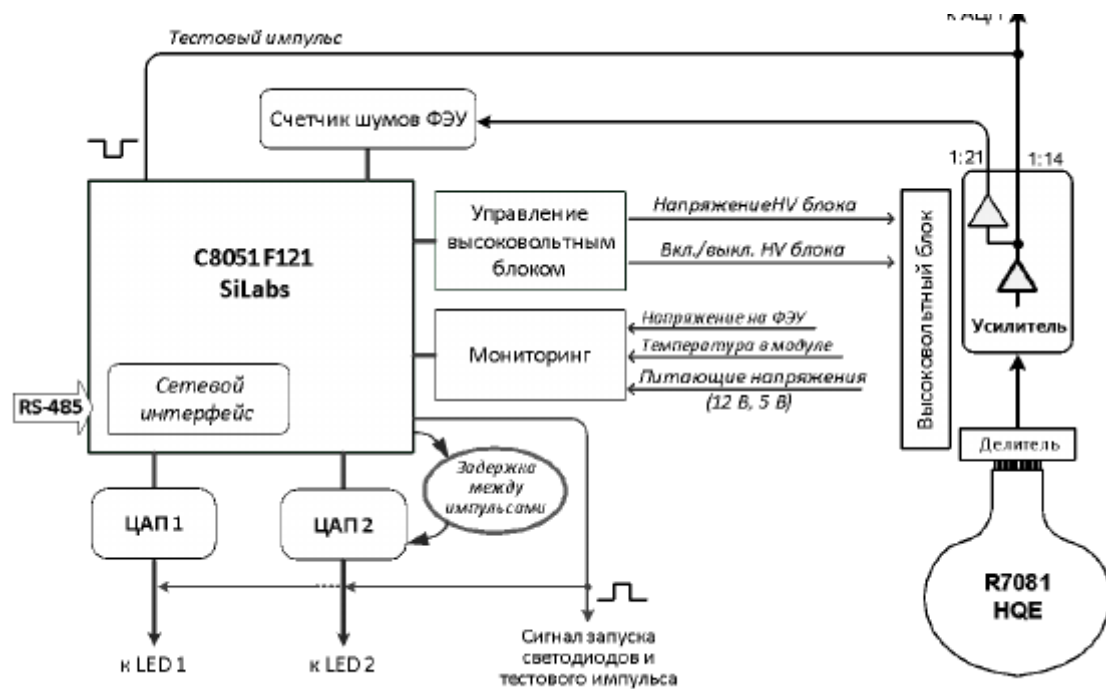


Рисунок 2.7 — Функциональная схема оптического модуля.

Блок высокого напряжения (Traco Power SHV 12-2.0 К 1000 P) обеспечивает электропитание делителя ФЭУ (18 МОм) в диапазоне от 0 до 2,2 кВ напряжением положительной полярности. Коэффициент усиления ФЭУ устанавливается на уровне 10^7 путем подбора напряжения на делителе. В зависимости от экземпляра ФЭУ, величина напряжения может варьироваться в диапазоне от 1150 до 1750 В. Общее усиление спектрометрического канала ОМ (с учетом предусилителя) составляет $\sim 10^8$ при длительности выходного сигнала 20 нс и амплитуде одноэлектронного сигнала ~ 30 мВ. При этом диапазон линейности канала составляет величину $\sim 10^2$ ф.э. Второй выход предусилителя используется для мониторинга темпа счёта одноэлектронных сигналов ФЭУ. В оптическом модуле также предусмотрены два синих светодиода Kingbright L7113 PVC-A для временной и амплитудной калибровки измерительного канала. Длина волны на максимуме излучения светодиодов составляет 470 нм, длительность импульса ~ 5 нс. Интенсивность излучения светодиодов регулируется в интервале от единиц до 10^8 фотонов на вспышку. Кроме того предусмотрена возможность задержки запуска одного светодиода относительно другого на время до ~ 1000 нс.

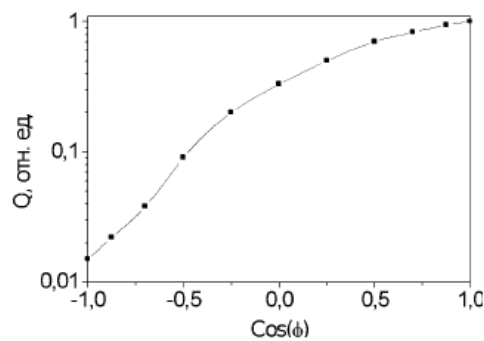
Система управления оптическими модулями разработана на основе микроконтроллера C8051F121 SiLabs. С его помощью осуществляется управление

напряжением на ФЭУ, частотой и интенсивностью свечения светодиодов системы калибровки, а также мониторинг в реальном времени шумов ФЭУ и других параметров электроники. В контроллер ОМ также встроен генератор специальных тестовых импульсов, которые формируются на выходе спектрометрического канала. Момент генерации тестового импульса синхронизован с запуском светодиода, что позволяет измерять время между сигналами с ФЭУ от светодиода и тестовым импульсом (задержку фотоэлектронного умножителя). Управление контроллером оптического модуля осуществляется по линии медленной связи (линии управления), организованной на базе интерфейса RS-485. Скорость обмена данными по этому каналу может выбираться из двух значений: 9600 и 115200 бит/сек.

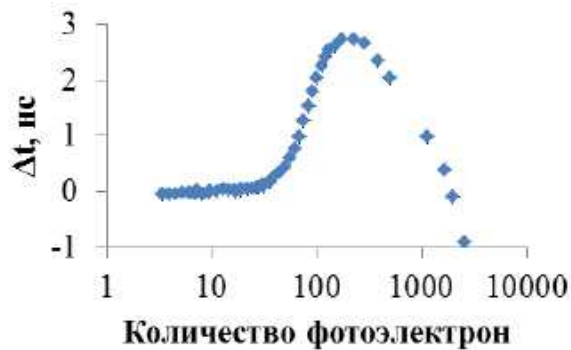
На Рис. 2.8 представлен ряд параметров оптических модулей, измеренных в лабораторных условиях, влияющих на регистрацию и восстановление событий в нейтринном телескопе.

На выходе оптического модуля по запросу управляющей программы формируются пакеты данных, содержащие статусную и мониторинговую информацию о работе ОМ. Пакеты данных ОМ по каналу RS-485 транслируются в центральный модуль секции, где преобразуются в TCP пакеты для последующей передачи в центр сбора данных детектора. Данные о режиме работы ОМ содержат информацию о включении высоковольтного напряжения на ФЭУ, состоянии калибровочной светодиодной системы (частоту запусков светодиодов, интенсивность, задержку между сигналами с двух светодиодов), факте включения генераторов тестовых импульсов, настройках счетчика шумовых импульсов ОМ (порога регистрации, времени, периоде накопления и размере буфера данных). Мониторная информация ОМ содержит данные о температуре внутри модуля, величине высоковольтного напряжения ФЭУ, напряжениях электропитания 12 В и 5 В, данные из буфера счетчика шумов оптического модуля.

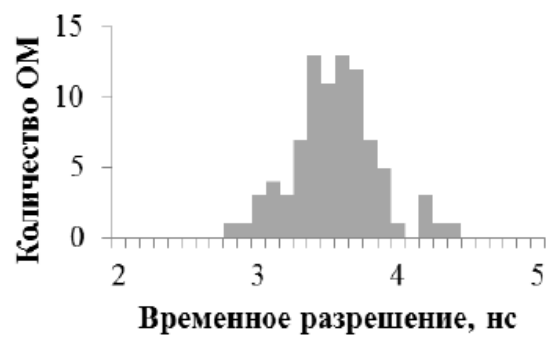
Оптический модуль сам не формирует пакеты данных, содержащие физическую информацию. Аналоговые сигналы с выхода оптического модуля поступают на вход платы АЦП, установленной в центральном модуле секции, где и осуществляется формирование пакетов физических данных.



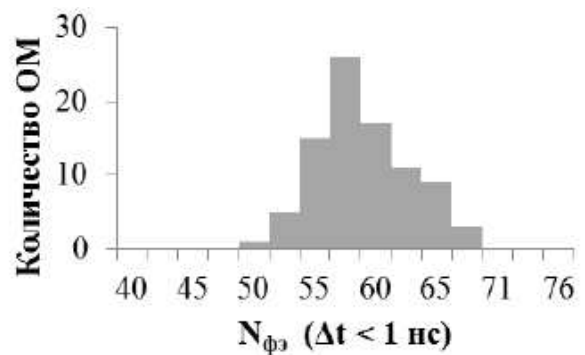
а) Зависимость отклика ОМ от угла падения света на фотокатод ϕ .



в) Пример зависимости отклонения измеренного времени регистрации ОМ от номинального значения Δt от количества фотоэлектронов в импульсе N



б) Распределение ОМ по величине временного разрешения.



г) Распределение ОМ по граничному значению N для которого $\Delta t < 1$ нс.

Рисунок 2.8 — Характеристики ОМ, измеренные в лабораторных условиях.

2.2.2 Секция оптических модулей

Секция ОМ представляет собой функционально законченный узел детектора, включающий в себя системы регистрации излучения, обработки сигналов, калибровки, формирования триггера и передачи данных. Аппаратура системы сбора данных секции позволяет формировать различные конфигурации регистрирующей системы: возможна установка оптических модулей на различных расстояниях друг от друга индивидуально или попарно. На одной гирлянде могут быть размещены несколько секций ОМ [55]. Базовая конфигурация секции представлена на Рис. 2.9. Секция состоит из 12 ОМ, расположенных с шагом 15 м вдоль гирлянды, и центрального модуля секции (ЦМ). В состав ЦМ входит

12-канальная плата АЦП, плата управления работой ОМ и Ethernet-модем для передачи данных.

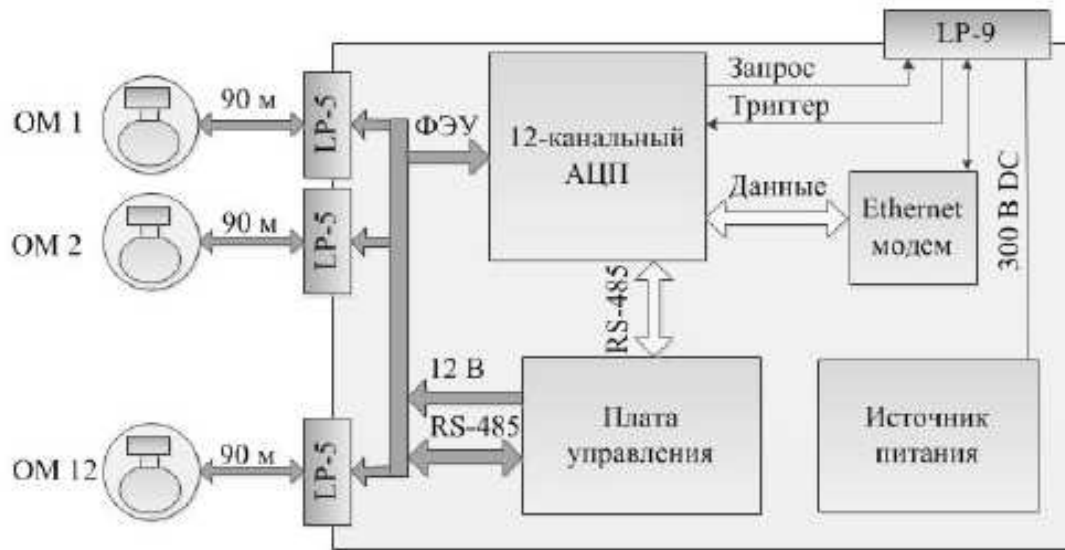


Рисунок 2.9 — Схема секции Baikal-GVD

Плата АЦП обеспечивает преобразование аналоговых сигналов оптических модулей секции в цифровой код. На плате АЦП установлены шесть 2-х канальных 12-битных микросхем АЦП AD9613 с частотой дискретизации 200 МГц. Оцифрованный сигнал с АЦП транслируется в FPGA (Xilinx Spartan 6). Программное обеспечение FPGA, загружаемое по каналу передачи данных, обеспечивает управление, буферизацию и первичную обработку поступающих от АЦП данных. Буфер памяти FPGA позволяет накапливать информацию о форме входных сигналов во временном интервале до 5 мкс. К измерительному каналу подключен пиковый детектор и амплитудный анализатор, которые аккумулируют мониторинговую информацию (амплитудные гистограммы), позволяющую контролировать работу измерительного канала. На выходе платы АЦП формируется временные кадры каналов, содержащие информацию о форме импульсов ОМ. Кроме того она обеспечивает выработку локальных триггерных сигналов, которые используются для формирования общего триггера установки, предварительную обработку данных каналов АЦП с целью выделения полезной информации из временных кадров, формирование записей, содержащих кадры каналов и передачу их в центр сбора данных установки.

Передача данных, сформированных в плате АЦП, осуществляется по каналам Ethernet (протокол TCP/IP). Длина линий передачи достигает величины до 1000 метров витой пары, что требует применения удлинителей каналов

Ethernet. Для этих целей используются shDSL модемы, для которых скорость передачи данных на расстояние до 1 км составляет величину около 10 Мбит/сек.

Плата управления ОМ обеспечивает включение и выключение электропитания оптических модулей, трансляцию команд управления и передачу мониторинговой и статусной информации от ОМ. Функциональная схема платы управления представлена на Рис. 2.10.

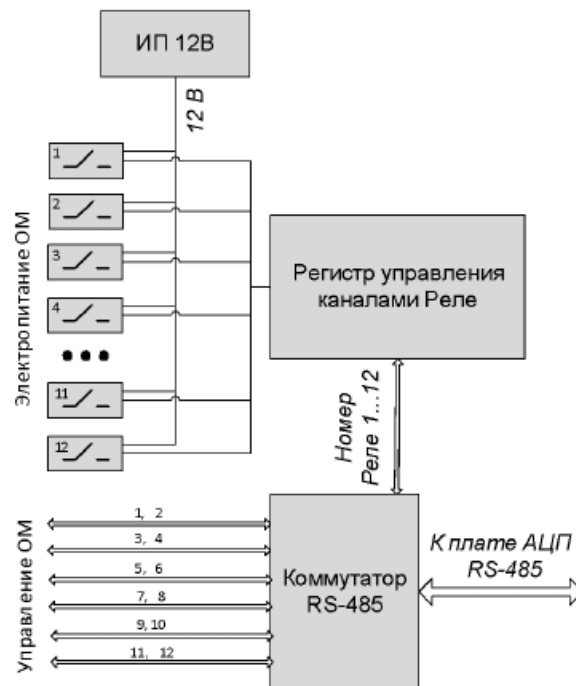


Рисунок 2.10 — Функциональная схема платы управления оптического модуля Baikal-GVD.

Плата управления включает в свой состав 6 коммутируемых каналов RS-485. Включение и выключение напряжения ОМ (12 В) осуществляется 12 канальным блоком реле. Данные, необходимые для работы платы управления, поступают по каналу Ethernet из центра сбора данных установки на плату АЦП, которая транслирует их в коммутатор RS-485. Коммутатор в свою очередь пересылает пакет данных в контроллер оптического модуля, адрес которого указан в заголовке пакета. К каждому каналу коммутатора подключено два оптических модуля. Скорость передачи информации может быть установлена 9600 или 115200 бод.

Статусная информация, получаемая с модуля центра секции, содержит данные о состоянии электропитания оптических модулей секции, режиме рабо-

ты и временных параметрах платы АЦП. Режим работы АЦП характеризуется условиями формирования триггера (внешний, автономный или принудительный триггер) и параметрами триггерной системы (маской каналов участвующих в формировании триггера, порогами регистрации каналов, разрешающим временем и кратностью совпадений). Основными временными параметрами платы АЦП являются длительность временного кадра канала, временная сдвигка кадра относительно общего триггера, установленные временные задержки локального триггера (сигнал запрос) и общего триггера (сигнал подтверждение), длительность мертвого времени после формирования сигналов запрос и регистрации сигнала подтверждение.

Данные мониторинга информации представляют собой амплитудные распределения сигналов (мониторные гистограммы), зарегистрированные на каналах платы АЦП (т.е. превысивших порог регистрации). Амплитудные распределения каналов формируются независимо от факта выработки триггера и позволяют контролировать пороги регистрации и темпы счета шумов каналов в зависимости от амплитуды входных сигналов. Амплитудное разрешение мониторинга гистограмм ограничено объемом выделяемой памяти FPGA и составляет 2 канала АЦП. Пример мониторинга гистограммы представлен на Рис. 2.11.

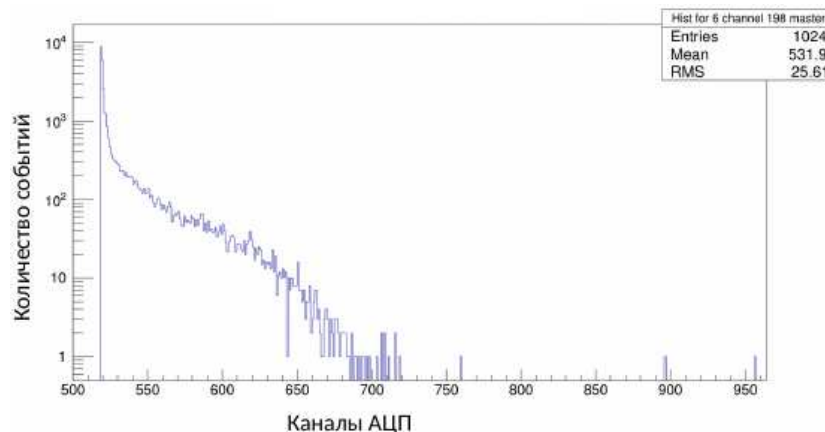


Рисунок 2.11 — Пример мониторинга гистограммы

Физические данные, поступающие с модуля секции, содержат временные кадры каналов, объединенные в виде записей АЦП. Размер кадра канала составляет 2 Кбайт. Пример временного кадра показан на Рис. 2.12

Как видно из Рис. 2.12, даже для кадров, содержащих несколько сигналов ФЭУ (в данном случае 4) подавляющая часть данных не несет полезной информации. Для повышения эффективности работы системы передачи данных в

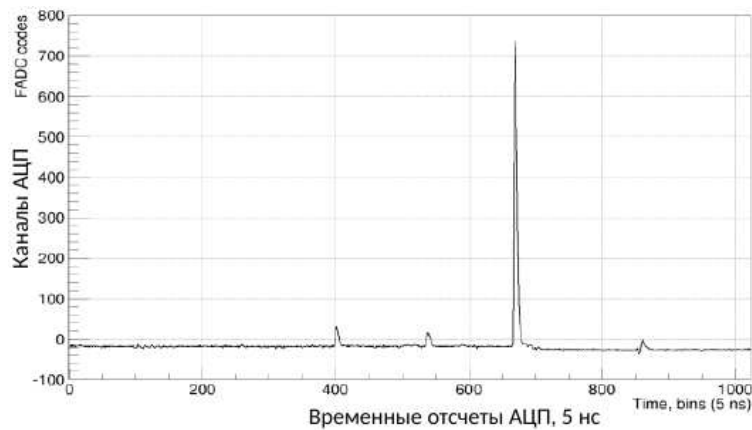


Рисунок 2.12 — Пример временного кадра канала

плате АЦП реализована on-line процедура выделения сигналов из временных кадров (фильтрация). Алгоритм фильтрации осуществляет поиск сигналов на дорожке и выделяет области, в которых сигнал превышает заданный порог. Для контроля величины пьедестала АЦП к выделенной части дорожки добавляется область, предшествующая моменту возникновения импульса. Время, затрачиваемое на процедуру фильтрации кадров, является одним из ключевых параметров системы сбора данных. Путем оптимизации алгоритмов фильтрации и перевода их на аппаратный уровень FPGA время обработки было снижено с ~ 20 мс (2014 год) до $\sim 0,5$ мс (2015 год).

Временные кадры после прохождения процедуры фильтрации записываются в буфер данных и форматируются в записи для их последующей передачи в центр сбора данных установки. Помимо кадров каналов, записи содержат информацию о номере платы АЦП, времени регистрации, измеренному по локальным часам, и состоянии счетчиков сигналов запрос и подтверждение.

2.2.3 Гирлянда

Каждая гирлянда включает в свой состав две (или три) секции ОМ и четыре акустических модема гидроакустической системы позиционирования (см. Рис. 2.13).

Данные, получаемые от секций через Ethernet-модемы, транслируются через Ethernet-коммутатор и дополнительный модем в центр сбора данных кластера (длина кабеля ~ 1 км). Сигналы запросов секций объединяются, форми-

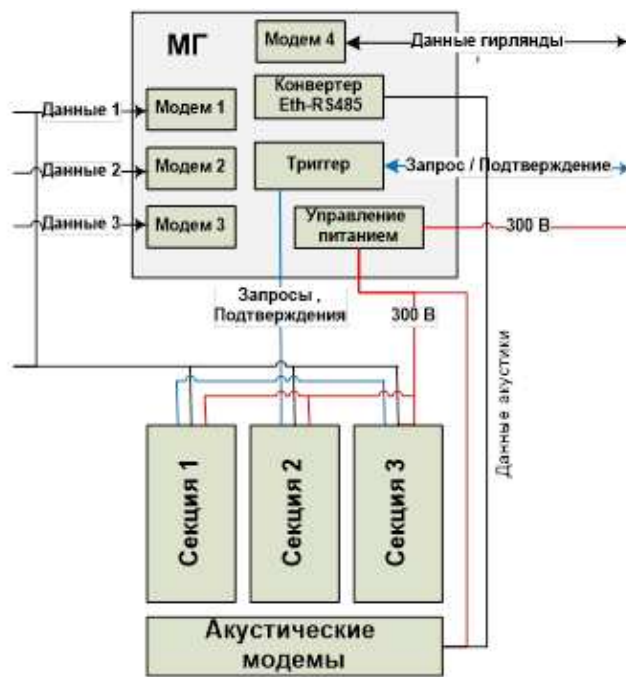


Рисунок 2.13 — Блок-схема коммутационного модуля гирлянды

руя запрос гирлянды, а сигнал подтверждения (общий триггер, поступающий из центра кластера) разветвляется на все секции. Электропитание подается на секции через управляемый многоканальный релейный коммутатор напряжения 300 Вольт, оснащенный системой мониторинга выходного напряжения. Акустические модемы подключаются к модулю гирлянды по независимому кабелю, по которому поступает электропитание и передаются данные о положении гирлянды (используется общая шина RS-485).

От модуля гирлянды поступает статусная информация о состоянии электропитания гирлянд и мониторинг – о величине напряжения на выходах коммутатора напряжения 300 Вольт.

2.2.4 Кластер

Базовая конфигурация кластера Baikal-GVD включает в свой состав 8 гирлянд, центр управления кластера (ЦК) и электро-оптический кабель, который связывает кластер с Береговым центром сбора данных (БЦ). Центр управления

кластера состоит из 4-х модулей (см. Рис. 2.14): модуль данных, триггерный модуль, модуль электропитания и оптический наконечник.

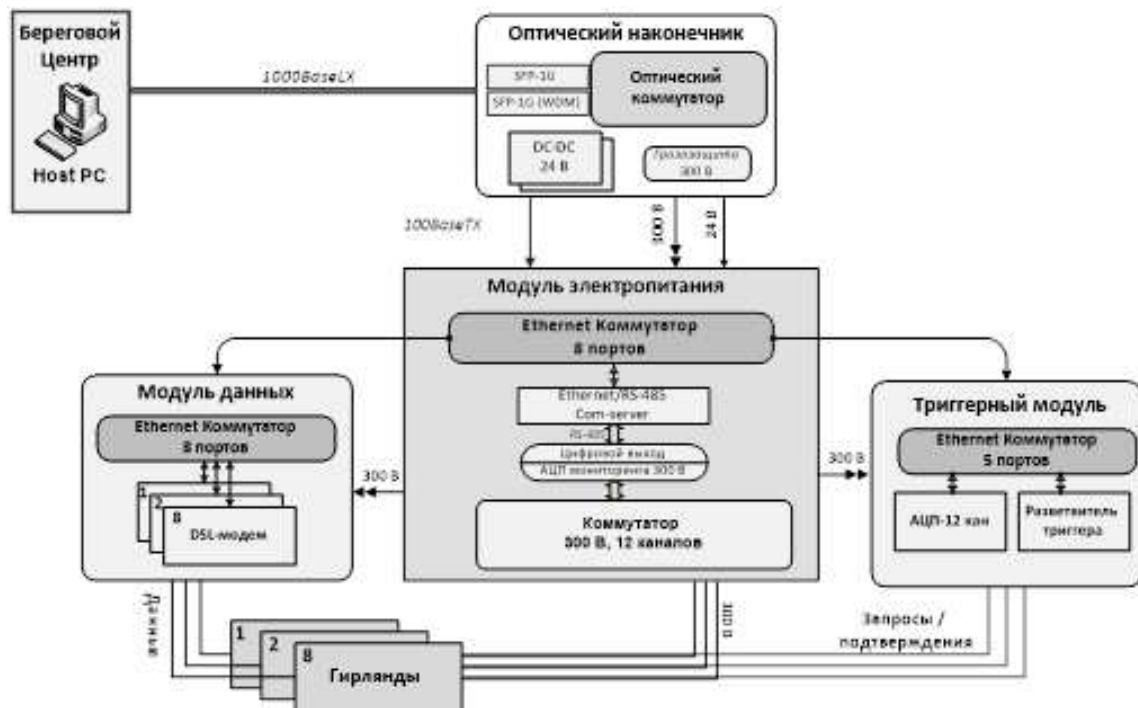


Рисунок 2.14 — Блок-схема центра кластера

Гирлянды подключаются к центру кластера через кабели длиной ~ 1 км, по которым передаются данные, электропитание 300 В и триггерные сигналы (запрос и подтверждение). Электропитание гирлянд осуществляется через многоканальный коммутатор 300 Вольт (один канал на гирлянду), аналогично организации электропитания секций. Данные поступают на модуль данных, оснащенный 8-ю DSL-модемами (скорость передачи около 10 Мбит/сек). Сигналы запросов гирлянд поступают на триггерный модуль, в котором установлена плата АЦП, аналогичная платам, размещаемым в модулях центра секций. Запросы с 8 гирлянд подключены к входам платы АЦП. На основании анализа кратности совпадений сигналов запросов, плата АЦП формирует общий триггер установки. Обмен данными между модулями центра кластера осуществляется по каналам Ethernet (~ 100 Мбит). Передача данных в Береговой центр производится по оптическому каналу связи электрооптического кабеля. По этому же кабелю на кластер подается питающее напряжение 300 Вольт.

При проектировании центра кластера была использована аппаратура, аналогичная той, что устанавливается в модулях секций и гирлянд: 12-канальные платы АЦП, коммутаторы 300 Вольт, DSL-модемы. Поэтому пакеты данных,

поступающие от центра кластера, содержат ту же информацию, что и от указанных выше модулей.

2.3 Триггерная система кластера Baikal-GVD

Задачей триггерной системы является эффективная регистрация мюонов и каскадных ливней при условии подавления фоновых событий до уровня, обеспечивающего возможность передачи информации от фотодетекторов в Береговой центр сбора данных установки. Источниками фона при работе телескопа являются атмосферные мюоны, свечение воды оз. Байкал и собственные шумы фотоэлектронных умножителей. Частота регистрации атмосферных мюонов кластером Baikal-GVD составляет величину ~ 50 Гц. Подавление фона от атмосферных мюонов основано на выделении событий из нижней полусферы, обусловленных взаимодействием нейтрино, прошедших сквозь Землю. Выделение таких событий возможно как на аппаратном уровне, так и в результате off-line анализа данных. В последнем случае система передачи данных детектора должна обеспечивать эффективную передачу событий с частотой не менее 50 Гц.

Принципиально важной особенностью фонового свечения озера Байкал является отсутствие световых вспышек. Следствием этого является одноэлектронный характер фоновых сигналов. В этих условиях не наблюдается временная корреляция сигналов, зарегистрированных разными ОМ. Методика аппаратного подавления фонового свечения воды основана 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.

Как указывалось выше, оптические модули установки сгруппированы в секции. На уровне секции формируется локальный триггер (сигнал *запрос* секции), вырабатываемый на основании аппаратной обработки сигналов от 12 ОМ. Подавление шумовых триггерных срабатываний до необходимого уровня обеспечивается выбором кратности совпадений и порогов регистрации сигналов. Максимальная частота формирования триггерных сигналов секций ограничивается скоростью передачи по линиям данных гирлянд (~ 10 Мбит/сек). Локальные

триггеры секций объединяются в модулях гирлянд и поступают в центр сбора данных кластера, где формируется глобальный триггер. Для реализации представленного подхода формирования триггера была разработана специализированная аппаратура, включающая в свой состав модули анализа триггерных условий, блоки управления и устройства передачи триггерных сигналов.

2.3.1 Аппаратура триггерной системы

Аппаратура триггерной системы размещается в центральных модулях секций (ЦМ), модулях гирлянд (МГ) и в центре кластера (ЦК). Триггерная аппаратура ЦМ интегрирована с аппаратурой системы сбора данных секции и размещается на плате АЦП. Блок-схема триггерного канала платы АЦП показана на Рис. 2.15. АЦП преобразует аналоговые сигналы, поступающих от ОМ, во временную последовательность кодов измеренных напряжений (частота дискретизации 200 МГц). Полученные данные накапливаются в кольцевом буфере АЦП. Одновременно с накоплением данных в буфере, информация с АЦП поступает в триггерный канал, предназначенный для формирования локальных запросов каналов. Процедура формирования сигнала запрос включает в себя сглаживание сигналов и анализ их амплитуды. Сглаживание предназначено для подавления коротких (с длительностью < 10 нс) импульсов, обусловленных шумами электроники. Сигнал после сглаживания поступает на цифровой дискриминатор, где сравнивается с пороговыми значениями, и компилятор запросов. В настоящее время предусмотрено два уровня порогов сигналов: низкий порог (L) и высокий (H). Значения порогов могут регулироваться. При превышении сигналом значения низкого порога осуществляется проверка на наличие превышения высокого порога в интервале 120 нс. В результате на выходе компилятора запросов формируется *локальный запрос* со статусом L или H , привязанный во времени к моменту превышения сигналом низкого порога. Локальные запросы каналов используются для выработки *запроса секции* и для формирования амплитудных спектров каналов (амплитудных гистограмм), которые накапливаются в буферах памяти платы АЦП.

Формирование *запроса секции* выполняется в анализаторе каналов, куда поступают локальные запросы 12 каналов секции. Технически, анализатор за-

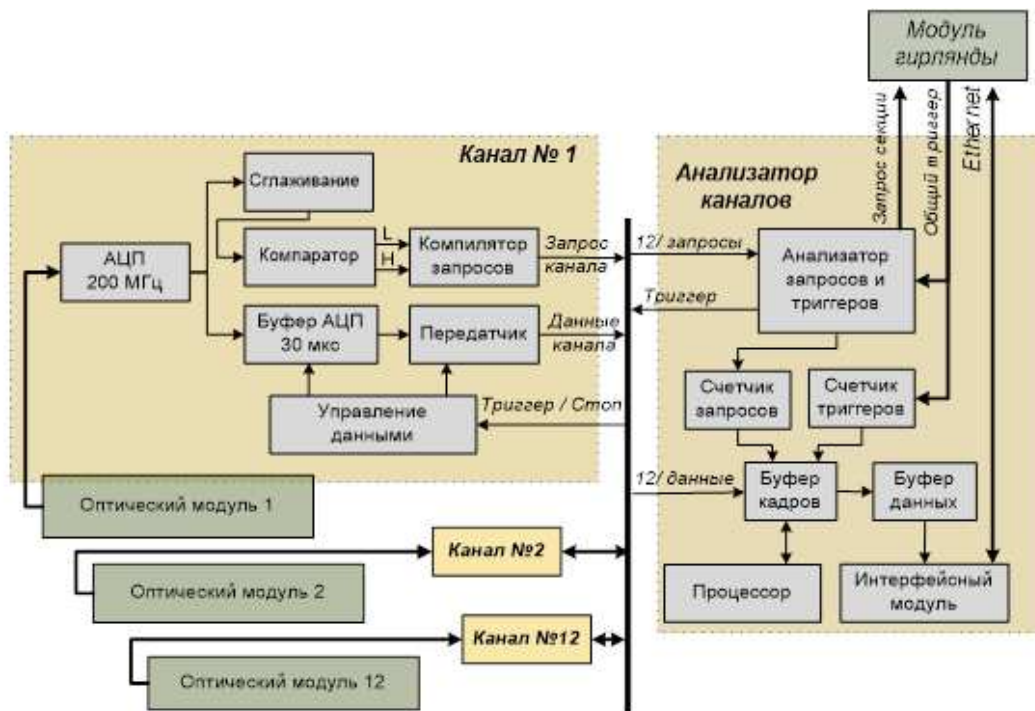


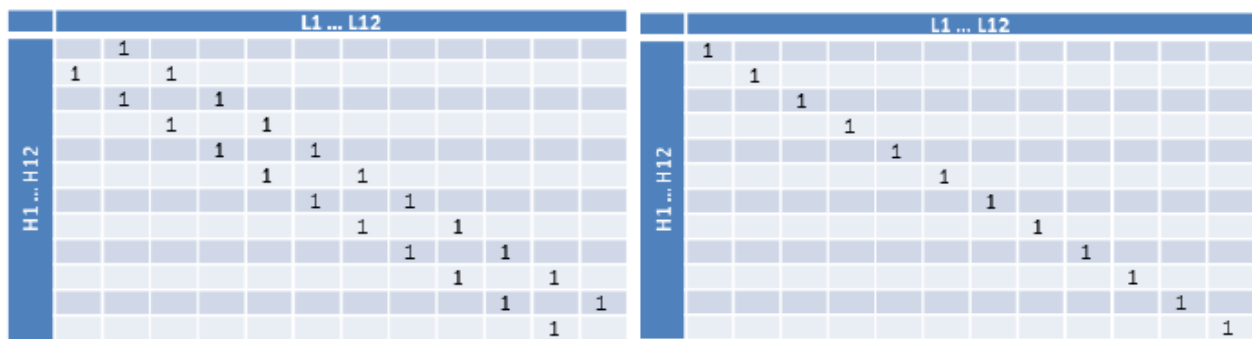
Рисунок 2.15 — Схема формирования триггера секции.

просов реализован как матрица совпадений запросов L и H ($12L \times 12H$), где запросы каналов суммируются в соответствии со значениями ячеек матрицы. В матрицу совпадений записывается информация о конфигурации каналов, совпадение запросов с которых в заданном временном окне должно сопровождаться выработкой запроса секции. После поступления первого локального запроса в матрицу совпадений начинается суммирование всех пришедших запросов в течение установленного времени (временное окно схемы совпадений). По окончании этого времени полученная сумма сравнивается с установленной величиной кратности совпадений.

На Рис. 2.16 представлены в качестве примера два варианта заполнения матрицы совпадений. Величина временного окна схемы совпадений задается динамически в диапазоне от 10 нс до единиц миллисекунд.

Запрос секции поступает на счетчик запросов и передается в центр кластера, где формируется общий триггер. Кроме работы под управлением общего триггера предусмотрен режим “автономной” работы секции. В этом режиме сигнал запрос секции используется как триггер для АЦП.

Триггерный сигнал разветвляется на все каналы АЦП, останавливая процесс заполнения основного буфера данных и инициируя передачу информации в буфер кадров. Буфер кадров содержит информацию о форме сигналов на



- а) Совпадение пары соседних каналов с низким и высоким порогами
 б) Совпадение каналов с низким порогом и заданной кратностью.

Рисунок 2.16 — Вид матрицы совпадений для двух режимов работы триггерной системы

всех каналов секции в заданном временном окне. Величина временного окна задается динамически в пределах 5 мкс. Для минимизации мертвого времени канала после регистрации триггера процесс оцифровки сигналов продолжается, при этом запись данных производится в резервный кольцевой буфер.

На Рис. 2.17 представлена схема системы формирования общего триггера кластера.

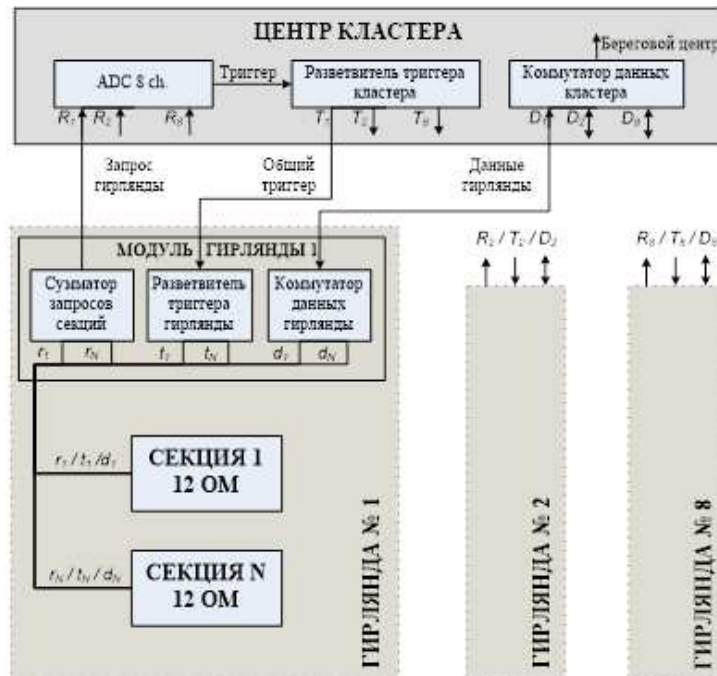


Рисунок 2.17 — Схема организации триггера и передачи данных установки

Локальные запросы от всех секций поступают на модуль гирлянды. Он включает в себя следующие элементы: сумматор запросов секций, разветви-

тель триггера и коммутатор данных. На сумматоре запросы секций (r_1, \dots, r_N) объединяются в один запрос гирлянды (R). Анализ запросов от всех 8 гирлянд кластера осуществляется в Центре кластера. Для этих целей используется плата АЦП, аналогичная платам, установленным в секциях ОМ. Запросы гирлянд поступают на входы платы АЦП. На выходе платы АЦП формируются временные кадры, позволяющие анализировать время прихода сигналов запрос, и сигнал запроса кластера, который выступает в роли общего триггера (сигнал подтверждение). Условия формирования запроса кластера достаточно гибкие: возможно объединение по “ИЛИ” запросов от гирлянд (базовый режим работы), организация совпадений любой кратности в динамически задаваемом временном окне, совпадение соседних гирлянд.

Запрос кластера поступает на разветвитель, который формирует триггерные сигналы для всех гирлянд кластера (T_1, \dots, T_8). Триггерные сигналы из центра кластера передаются в модули гирлянд по коаксиальным кабелям длиной около 1 км, где разветвляются на все секции, входящие в состав гирлянды. Триггерный сигнал останавливает работу АЦП и инициирует процесс передачи данных от секций.

2.3.2 Оптимизация триггерных условий Baikal-GVD

Аппаратура триггерной системы позволяет достаточно гибко управлять условиями выработки триггера кластера: кратностью совпадений каналов и гирлянд, порогами триггерных сигналов. Предусмотрена возможность формирования различных групп ОМ, участвующих в совпадениях: произвольная выборка оптических модулей секции и соседние ОМ. Частота выработки триггерных сигналов ограничена производительностью процессора платы АЦП, осуществляющего обработку временных дорожек и выделение полезных сигналов: максимальный темп поступления триггерных сигналов составляет величину ~ 1 кГц. Задача оптимизации триггерной системы заключается в выборе триггерных условий, обеспечивающих максимально эффективную регистрацию физических событий при условии ограничения на максимальный темп формирования триггерных сигналов.

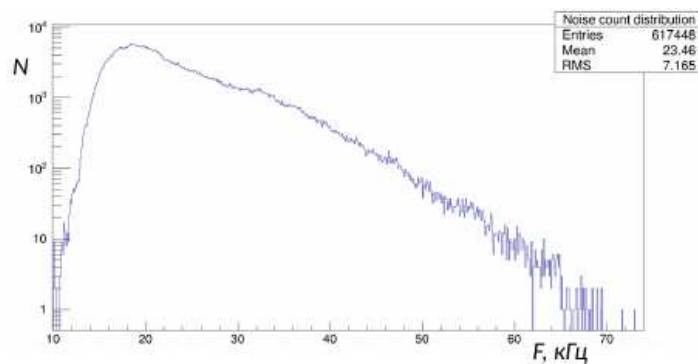
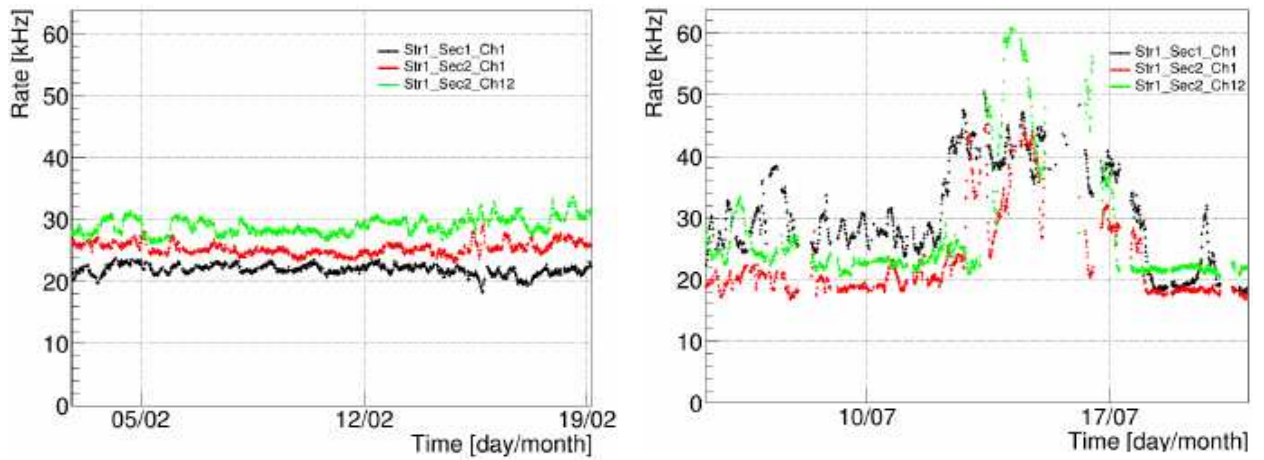


Рисунок 2.18 — Распределение измеренных значений темпа счёта 72 ОМ, установленных в оз. Байкал

Основным источником фоновых событий, определяющих темп счёта триггерной системы, являются срабатывание оптических модулей от сигналов, генерируемый свечением байкальской воды и темновыми шумами ФЭУ. Для подавления фоновых событий применяется метод совпадений сигналов между каналами. Выбор кратности совпадений и порогов регистрации сигналов определяется частотой срабатываний (темпами счёта) оптических модулей и видом амплитудного спектра шумов. Исследования шумовых характеристик ОМ на базе ФЭУ R7081-100 проводились на протяжении более трех лет в оз. Байкал. Для этих исследований использовались данные мониторинга темпа счёта шумов ОМ и результаты измерений амплитудных спектров шумовых каналов. Измерения проводились с периодом 10 – 20 минут на протяжении всего времени экспозиции установки. Для измерения темпа счёта шумов использовались счетчики, установленные в каждом ОМ. Порог регистрации счетчиков составлял величину 0.3 – 0.5 ф.э. Для измерения шумовых амплитудных спектров каналов использовались мониторные гистограммы, формирующиеся в платах АЦП.

Пример распределения темпов счёта шумов для 72 ОМ в период с апрель по декабрь 2013 года представлен Рис. 2.18 Средний годовой темп счёта составил величину около 25 кГц при пороге регистрации 0.3 ф.э. Достаточно широкое распределение темпов счёта ОМ обусловлено главным образом сезонными вариациями интенсивности свечения воды (см. Рис. 2.19).

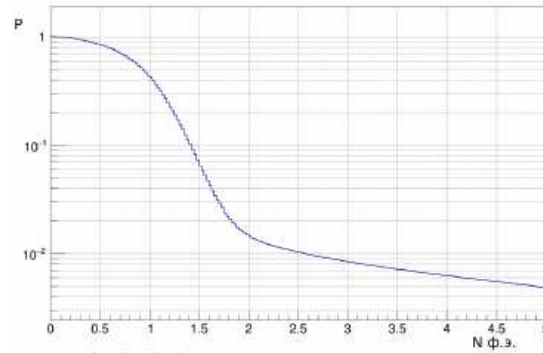
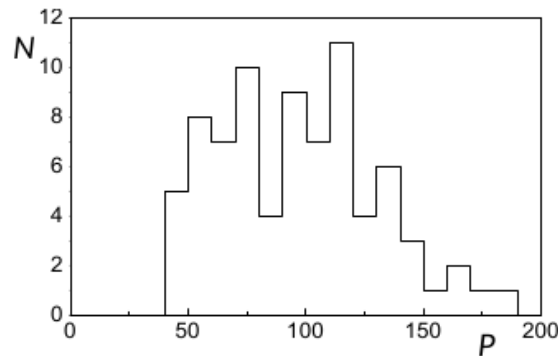
Для того, что бы исследовать возможность подавления шумов порогом регистрации использовались амплитудные гистограммы каналов. На основании данных гистограмм вычислялась вероятность превышения сигналом ОМ заданного порога регистрации (фактор ослабления шумов). На Рис. 2.20 представлен пример зависимости фактора ослабления шумов P от порога регистрации. При



а) Зимний сезон

б) Летний сезон

Рисунок 2.19 — Зависимость темпов счёта ОМ от времени в разные сезоны

Рисунок 2.20 — Пример зависимости фактора ослабления шумов ОМ P от порога регистрацииРисунок 2.21 — Распределение фактора ослабления шумов P для порога 3 ф.э.

пороге около 3 ф.э. фактор ослабления для выбранного экземпляра ОМ достигает значения $\sim 10 - 2$. Распределение ОМ по величине фактора ослабления P при пороге 3 ф.э. представлено на Рис. 2.21 для партии из 80 оптических модулей, установленных в оз. Байкал в 2015 году. В среднем, $P \sim 10^2$ со среднеквадратичным отклонением ~ 30 .

Частота формирования сигналов запрос секции определяется количеством ОМ, участвующих в совпадениях, кратностью совпадений, порогами каналов и временным окном схемы совпадений. При расстоянии между оптическими модулями 15 м, минимальная величина временного окна для совпадений соседних каналов составляет величину ~ 100 . При этом расчетная частота совпадений между парами каналов $\sim 1.3 \times 10^2$ Гц для порога регистрации ~ 0.5 ф.э. Для секции из 12 оптических модулей суммарная частота совпадений пар соседних каналов достигает величины ~ 1.5 кГц. В том случае, если порог регистрации одного из каналов, участвующих в совпадениях, устанавливается на уровне 3 ф.э., частота срабатываний пар соседних каналов для секции уменьшается до ~ 20 Гц (совпадения сигналов с порогами 0.5 и 3 ф.э. на 11 парах соседних ОМ). Расчет частоты формирования запросов секций имеет оценочный характер. В нем не учитываются сезонные вариации и глубинная зависимость интенсивности свечения воды оз. Байкал. В таблице 1 представлены результаты экспериментальных измерений этого параметра для разных значений порогов пар каналов и разной глубины расположения секций. В целом, оценочные расчеты согласуются с экспериментом.

Таблица 1 — Частота формирования сигнала *запрос* секции

Глубина / Пороги регистр. пар каналов	0.5/0.5 ф.э.	0.5/3 ф.э.	1.5 / 4 ф.э.
~ 700 метров	1.7×10^3 Гц	44 Гц	0.78 Гц
~ 900 метров	1.0×10^3 Гц	32 Гц	1.3 Гц
~ 1100 метров	0.6×10^3 Гц	20 Гц	0.87 Гц

Аппаратура триггерной системы поддерживает два режима работы установки. В первом режиме триггер секции вырабатывается непосредственно по сигналу запроса самой секции, не зависимо от других секций: так называемый асинхронный режим работы установки. Данный режим работы используется в режимах калибровки и тестирования секций. В то же время в асинхронном режиме возможна и регистрация физических событий: объединение данных от разных секций в событие осуществляется по времени поступления триггеров секций, измеряемом платами АЦП.

Во втором (синхронном) режиме работы, триггером секции является общий триггер кластера. Преимущество синхронного режима работа заключается в том, что данные установки содержат информацию с так называемых “несработавших” секций (секций, в которых не было реализовано условие формирования сигнала запрос), которую можно использовать для реконструкции событий. Недостатком является то, что частота триггерных сигналов увеличивается пропорционально количеству секций в кластере, что приводит к необходимости использования более жестких триггерных условий. Критерием выбор оптимального режима работы триггерной системы является эффективность регистрации физических событий (мюонов и каскадных ливней). Эффективность регистрации событий характеризуется величиной эффективной площади установки для регистрации мюонов. Для оценки эффективной площади моделировался отклик установки на мюоны для различных триггерных условий регистрации.

Моделирование отклика установки проводилось для изотропного потока мюонов из нижней полусферы Земли при фиксированном наборе энергий мюонов (от 1 ТэВ до 10 ПэВ). Распространение черенковского излучения мюонов в воде моделировались по специально созданным для Байкальского эксперимента программам [43]. Розыгрыш отклика оптического модуля на черенковское излучение проводился с учетом квантовой и угловой чувствительности фотодетекторов. Эффективная площадь для мюонов вычислялась для заданного типа триггера при условии срабатывания не менее 6 ОМ на не менее 3 гирляндах (условие 6/3), требующимся для восстановления геометрических параметров траекторий мюонов. На Рис. 2.22 представлена зависимость эффективной площади кластера Baikal-GVD в зависимости от энергии мюонов для различных триггерных условий.

Максимальная эффективная площадь для мюонов достигается в режиме синхронной работы установки для совпадения соседних каналов при низких порогах (0.5/0.5 ф.э.). При этих триггерных условиях темп счета триггеров F_t составляет величину $1.5 \times N$ кГц, где N – количество секций в кластере. Даже для минимальной конфигурации с 2-мя секциями на гирлянде $F_t = 25$ кГц, что более чем на порядок превышает ограничение на максимальное значение F_t ($F_t^{max} \sim 1$ кГц). При увеличении порогов регистрации до значений 0.5/3 и 1.5/4 ф.э. F_t снижается до уровня 500 и 20 Гц соответственно, что ниже F_t^{max} . Однако, в периоды повышенной интенсивности свечения оз. Байкал, F_t для порогов 0.5/3 ф.э. может превосходить предельно допустимое значение.

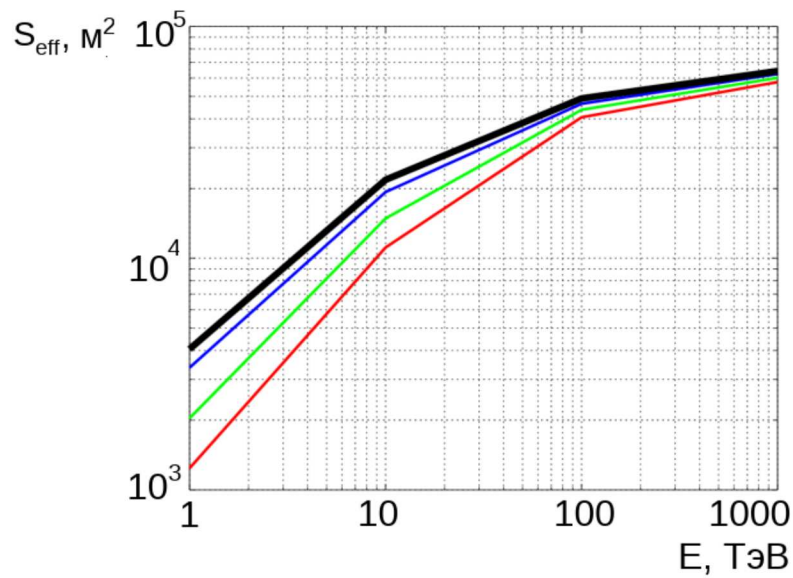


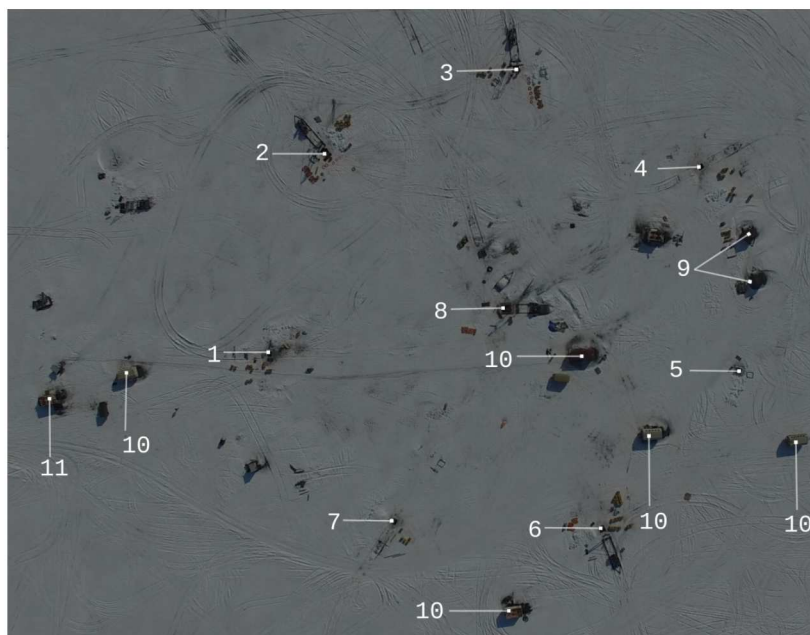
Рисунок 2.22 — Зависимость эффективной площади кластера Baikal-GVD от энергии мюонов для синхронного триггера с порогами 0.5/3 ф.э. (чёрн.) и асинхронных триггеров с порогами 0.5/0.5 (син.), 0.5/2 (зел.) и 0.5/3 ф.э. (красн.). Эффективная площадь вычисляется для событий, содержащих не менее 6 каналов на 3 гирляндах (необходимо для восстановления направления мюона).

В режиме совпадения запросов с двух гирлянд в синхронном режиме работы при порогах 0.5/0.5 ф.э. ожидаемый темп счета 1 кГц (окно совпадений для данной оценки выбрано равным 1 мкс). Однако недостатком такой организации триггера является потеря потенциально возможных событий, регистрируемых только одной гирляндой (например, мюоны, приходящие из направления на центр Земли). Для асинхронного режима работы даже в условиях минимальных порогов регистрации (0.5/0.5 ф.э.) эффективная площадь для мюонов меньше, чем для всех вышеперечисленных режимов формирования триггера.

2.4 Монтаж нейтринного телескопа в оз. Байкал

Установка новых компонентов Baikal-GVD выполняется во время ежегодных зимних экспедиций. Зимние экспедиции продолжаются приблизительно с 20 февраля по 15 апреля, когда ледяной покров Байкала достигает толщины, достаточной для выезда тяжёлой техники. Снабжение экспедиции осуществля-

ется почтовыми и грузовыми вагонами по Кругобайкальской железной дороге, либо автотранспортом из Иркутска и Байкальска по ледяному покрову озера Байкал.



- 1-7 Гирлянды №1-7 Baikal-GVD.
- 8 Гирлянда №8 и центр кластера.
- 9 Склады.
- 10 КУНГи.
- 11 Электрогенераторы

Рисунок 2.23 — Ледовый лагерь экспедиции 2016 г.

Экспедиционные работы проводятся на береговом центре и в ледовом лагере, расположенном непосредственно над детектором в 4 км от берега. Береговой центр служит для диагностики и тестирования аппаратуры телескопа, а также для удалённого управления установкой. В частности, на берегу проводятся работы по тестированию электроники и сборке ОМ, калибровке и тестированию подводных компонентов установки. Кроме этого, на берегу выполняется подготовка и обслуживание техники, используемой при монтаже телескопа. Ледовый лагерь включает в себя КУНГи (универсальные грузовые кузова), лебёдки, основной и запасной дизельные электрогенераторы, а также склады оборудования контейнерного типа. В КУНГах расположены тестовые стенды, запасная экипировка и инструменты, используемые для монтажа и технического обслуживания телескопа. Помимо этого, участники экспедиции отдыхают в КУНГах во время перерывов в полевых работах. Ледовый лагерь покрыт беспроводной Wi-Fi сетью и связан с берегом с помощью радиоканала. Это позволяет обеспечить оперативный обмен данными между береговым центром и ледовым лагерем, а также предоставляет участникам полевых работ доступ в интернет.

Зимняя экспедиция проходит в два этапа. На первом этапе разворачивается ледовый лагерь и выполняется подготовка к монтажу телескопа. В зависи-

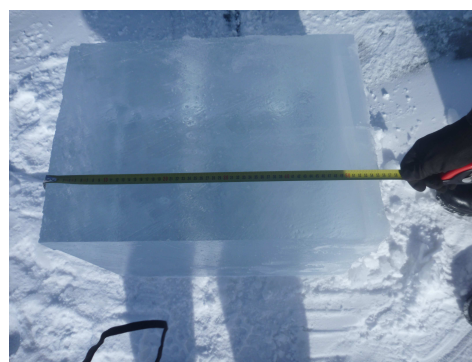
мости от погодных условий, логистики и масштаба задач экспедиции, первый этап продолжается от одной до полутора недель. На втором этапе выполняется непосредственно монтаж и техническое обслуживание телескопа. Работы продолжаются до достижения целей экспедиции либо до момента, когда продолжение работ становится невозможным из-за таяния ледяного покрова Байкала.

2.4.1 Подготовка ледового лагеря

Первый этап начинается с разметки ледового лагеря. Участки ледяного покрова, расположенные над гирляндами телескопа (1-8 на Рис. 2.23), определяются по известным GPS-координатам гирлянд, а также с помощью теодолита и береговых реперных точек. Параллельно с разметкой выполняется поиск оптимальных маршрутов от берегового центра до ледового лагеря по ледовому покрову Байкала. Над каждой гирляндой кластера вырезается прорубь (см. Рис 2.24 (а)); центр проруби расположен над якорем гирлянды. Гирлянды, на которых не запланировано никаких работ, игнорируются. Выполняются замеры толщины льда под лагерем (см. Рис. 2.24 (б)). Разметка лагеря и подготовка прорубей занимает 1-2 дня.



а) Снятие ледяного покрова



б) Толщина льда - 55 см.

Рисунок 2.24 — Подготовка ледового лагеря 2016 г.

После разметки и подготовки прорубей на лёд начинают вывозить полевое оборудование и монтажную технику. В первую очередь вывозятся склады, потом КУНГи с инструментами, дизельные генераторы и, наконец, лебёдки. От генераторов к КУНГам и лебёдкам проводятся линии питания, запускается ле-

довый Wi-Fi и связь с берегом. На то, чтобы развернуть и подготовить к работе ледовый лагерь, уходит от одного до двух дней.

Приповерхностные буи гирлянды телескопа обычно расположены на глубине 25-30 метров, а над ними расположена верёвочная петля, выдерживающая вес гирлянды под водой. Чтобы в дальнейшем гирлянду можно было поднять лебёдкой с поверхности, на эту петлю карабином крепится зафиксированный на поверхности трос (см. Рис. 2.25). Подводное крепление выполняется водолазами. Этим завершается первый этап зимней экспедиции.



Рисунок 2.25 — Крепление гирлянд телескопа к поверхности

2.4.2 Установка и техническое обслуживание гирлянд Vaikal-GVD

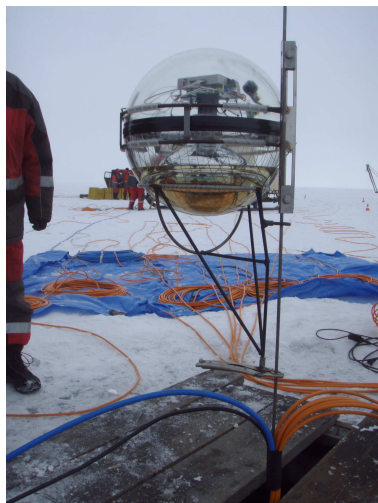
К началу второго этапа работ ледовый лагерь находится в полностью рабочем состоянии, а к каждой используемой в экспедиции гирлянде с поверхности проведён трос. Если в рамках экспедиции планируется установка новых гирлянд, то над предполагаемым положением их якорей также сделаны проруби. Не считая задач, специфических для отдельных экспедиций (прокладка кабелей, демонтаж старых установок и т. д.), работы на втором этапе можно разбить на монтаж и демонтаж гирлянд телескопа.

Гирлянды демонтируются для диагностики или обновления оборудования на берегу. Так, во время зимней экспедиции 2016 года несколько гирлянд кластера “Дубна” были разобраны для того, чтобы заменить АЦП центральных

модулей секции на более новую и быструю модель (со Spartan-3 на Spartan-6). Кроме того, демонтаж гирлянд выполняется для устранения неисправностей, обнаруженных либо во время предыдущего сезона работы установки, либо после сборки гирлянды во время экспедиции. На то, чтобы окончательно разобрать одну полностью собранную, подключённую к центру кластера и поставленную на дно периферийную гирлянду бригадой из четырёх человек, требуется в среднем 2-3 дня. Рассмотрим последовательность таких работ.

Демонтаж гирлянды начинается с того, что трос, прикрепленный к гирлянде во время подготовки ледового лагеря, заводится на лебёдку, которая отрывает гирлянду ото дна. Лебёдка поднимает гирлянду до тех пор, пока на поверхность не выйдут приповерхностные буи.

Затем, гирлянда перевешивается с троса на цепь, закреплённую на мачте лебёдки. Ослабленный трос сматывается с барабана лебёдки, приповерхностные буи демонтируются. На лебёдку заводится несущий пластиковый кабель-трос гирлянды (см. пункт 2.2.3), которая перевешивается с цепи на него. Гирлянда поднимается за пластиковый трос до его точки крепления с нержавеющей тросом.



а) ОМ, установленный на гирлянде



а) Модуль секции, установленный на гирлянде

Рисунок 2.26 — Монтаж элементов гирлянды Baikal-GVD, 2015 г.

После того, как нержавеющий трос оказался на поверхности, гирлянда перевешивается на цепь. Нержавеющий кабель-трос отсоединяется от пластикового и заводится на новую лебёдку. Демонтируется модуль гирлянды (он расположен в полуметре от точки сцепления пластиков и нержавеющей ка-

бель-тросов). Начинается подъём гирлянды и последовательный демонтаж навесных блоков гирлянды. Чтобы разобрать одну секцию требуется, в среднем, один день работы. После демонтажа секций на поверхность поднимается якорь. С него снимается зажим, крепящий якорь к тросу, и гидрофон, если он установлен на якоре. На этом демонтаж гирлянды завершён.

Монтаж новой гирлянды (при наличии всех блоков) полностью повторяет демонтаж в обратном порядке, за исключением следующих особенностей:

1. Сборка гирлянды занимает в среднем меньше времени, так как при демонтаже секций необходимо распутывать пучки кабелей вокруг кабель-троса, образовавшийся за счёт кручения гирлянды при подъёме.
2. После установки ОМ выполняется проверка работоспособности калибровочных светодиодов и отклика контроллера ОМ. Это позволяет определить неисправные кабели и ОМ в рабочих условиях. При проверке нижних шести модулей секции связь с ОМ осуществляется напрямую, при проверке верхних шести - через модуль секции.
3. После установки светодиодной матрицы выполняется проверка работоспособности её диодов и контроллера.
4. Наконец, после установки модулей секции и гирлянды выполняется проверка отклика всех ОМ секции или гирлянды соответственно.

После окончания монтажа всего кластера, начинается процесс отладки, которая занимает до двух недель времени. При отладке используются специальные тестовые программы как для отдельных устройств и режимов работы кластера, так и для всей установки в целом, включая береговую систему электроснабжения и приёма и передачи данных. Когда установка проходит все этапы тестирования, она переводится в штатный режим набора данных до следующей зимней экспедиции.

Глава 3. Пакет обработки данных BARS

Для решения задач подготовки данных, а также выделения и восстановления событий была разработана программная платформа BARS.

3.1 Требования к пакету обработки данных Baikal-GVD

На сегодняшний день в мире существует 3 проекта крупномасштабных нейтринных телескопов: IceCube, KM3Net и Baikal-GVD. Из этих трёх проектов только IceCube полностью развёрнут и функционирует, KM3Net находится в стадии отладки и проектирования, у Baikal-GVD установлен один кластер из 10-12 (в зависимости от конфигурации). IceCube использует систему собственной разработки IceTray [32]; KM3Net выполняет обработку на модифицированной версии IceTray [57]. Проект Baikal-GVD поступил иначе и разработал собственную систему обработки данных. Это решение было принято по нескольким причинам.

Во-первых, на аппаратном уровне Baikal-GVD отличается от IceCube и KM3Net. В IceCube и KM3Net ФЭУ расположены в DOM - цифровых оптических модулях. Цифровые оптические модули на месте выполняют обработку дорожек, выделяют импульсы и высылают их дальше по иерархии системы сбора данных. В Baikal-GVD выделение импульсов выполняется после сбора данных. Это и другие отличия от аналогичных установок накладывают архитектурные ограничения на BARS.

Вторая причина - существующие программные наработки NT-200. Восстановление и анализ данных NT-200 выполнялись с помощью набора программ, написанных на C и FORTRAN. Разработка собственной системы обработки означает, что последовательность обработки и формат данных определяется Baikal-GVD, а не существующей платформой. Следовательно, существующие программы можно сохранить с незначительными изменениями.

В-третьих, создание собственной платформы даёт больший контроль над последовательностью обработки данных. Возможность самостоятельно разработать архитектуру восстановления и обработки данных позволяет оптимизи-

ровать процесс под Baikal-GVD, а также облегчает исследование различных методов подавления шумов и восстановления.

Наконец, важным фактором является независимость от архитектурных решений IceCube. IceTray - это, в первую очередь, платформа обработки данных IceCube. Вполне возможно, что разработчики IceTray внесут в архитектуру пакета кардинальные изменения, оптимизирующие эффективность обработки IceCube, которые осложнят или замедлят обработку данных Baikal-GVD. В коллаборации KM3Net эту проблему решили, создав собственную систему обработки на основе IceTray. К несчастью, такое решение не подходит для Baikal-GVD, так как поддержка аналога IceTray требует больших людских ресурсов, чем те, что в настоящий момент доступны коллаборации.

Исходя из вышеперечисленного, было принято решение о разработке специального пакета для анализа данных Baikal-GVD. Пакет был назван BARS - Baikal Analysis and Reconstruction Software. Основой для BARS была выбрана система анализа данных MARS (MAGIC Analysis and Reconstruction Software [58; 59], разработанная для эксперимента MAGIC [60; 61]).

3.2 Архитектура MARS

Пакет MARS был разработан для обработки данных эксперимента MAGIC (англ. Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov Telescope) - наземного черенковского детектора, предназначенного для регистрации широких атмосферных ливней. MARS состоит из четырёх уровней абстракции и ядра:

1. Ядро отвечает за управление процессом обработки, чтение/запись данных, журнализацию и графический интерфейс.
2. Первый уровень представляет собой реализацию часто используемых, но не узкоспециализированных алгоритмов. Сюда относятся, в частности, алгоритмы машинного обучения, преобразования координат и т. д.
3. На втором уровне реализованы алгоритмы, характерные для атмосферных черенковских детекторов: подавление шумов (катами или с помощью статистических алгоритмов, представленных на первом уровне), выделение событий, восстановление энергии ШАЛ и т. д.

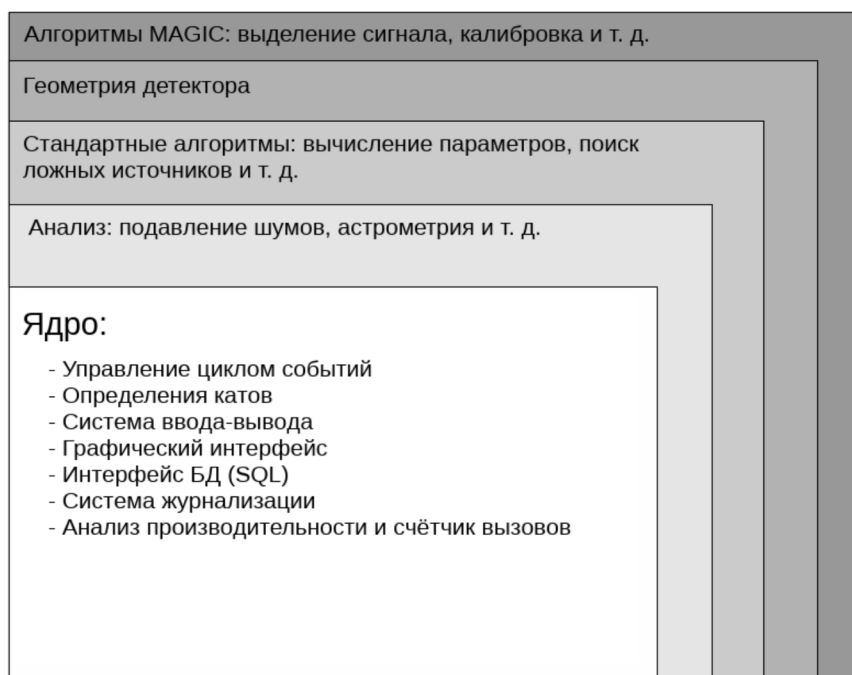


Рисунок 3.1 — Общая архитектура MARS

4. Третий уровень уровня MARS содержит описание геометрии детектора.
5. Наконец, четвёртый уровень содержит калибровочные таблицы и другую информацию, характеризующую установку MAGIC.

Алгоритмы обработки и структуры данных, используемые в MAGIC, малоприспособны для крупномасштабного черенковского детектора. Поэтому, основным компонентом MARS, используемым в BARS, является ядро; в первую очередь используются механизмы управления процессом обработки.

Основными абстракциями MARS, используемыми для обработки данных являются модули и контейнеры. Контейнеры (наследники `MParContainer`) предназначены для хранения экспериментальных данных и параметров обработки. У каждого контейнера есть имя и описание, позволяющее его идентифицировать. Примерами контейнеров могут быть калибровочные таблицы, мастерские записи или параметры восстановления. В MARS объекты классов-контейнеров создаются до обработки данных. Во время обработки меняется состояние существующих контейнеров, а новые не создаются. Такой подход позволяет избежать значительных временных затрат, связанных с вызовом конструкторов при обработке большого количества событий.

Модули (задачи, наследники класса `MTask`) выполняют обработку контейнеров, чтение и вывод данных. Модули создают, либо подписываются на су-

ществующие контейнеры перед обработкой данных. / В MARS, любой модуль может получить доступ к любому контейнеру, в том числе, созданному другим модулем. Однако, модуль должен указать список необходимых ему контейнеров до начала обработки. В идеальном случае, модуль должен выполнять только одну логически законченную операцию над контейнером и не иметь собственного состояния. Примеры задач, выполняемых отдельными модулями: чтение данных, фильтрация импульсов события по амплитуде, вычисление координат оптических модулей по данным системы акустического позиционирования.

В MARS, каждое событие проходит обработку последовательностью модулей. Последовательность модулей и набор используемых контейнеров не меняется от события к событию. В общем случае, обработка данных в MARS состоит из трёх этапов:

1. Создаются и инициализируются объекты модулей, которые будут участвовать в обработке.
2. Указывается порядок выполнения модулей в цикле событий.
3. Выполняется цикл обработки (цикл событий).

Цикл событий представлен на Рис 3.2 и состоит из трёх этапов:

1. Предобработка.

На этом этапе модули создают новые контейнеры, либо подписываются на существующие, а также читают конфигурационные файлы. После предобработки у модулей нет доступа к списку контейнеров, а есть только указатели на контейнеры, созданные во время предобработки. Предобработка модуля осуществляется методом `MTask::PreProcess`. Если во время предобработки какой-либо модуль вернул ошибку (`MTask::PreProcess` вернул `kFALSE`), то цикл событий прекращает работу. Этот этап выполняется в самом начале цикла событий и не повторяется во время обработки.

2. Обработка.

На этом этапе модули выполняют обработку контейнеров, созданных во время предобработки. Сюда входит чтение и запись данных, подавление шумов и восстановление событий. Эти действия выполняются методом `MTask::Process`. `MTask::Process` вызывается для каждого модуля в последовательности, указанной ранее. После того, как последний модуль закончил обработку, все используемые контейнеры возвращаются в исходное состояние (метод `MParContainer::Reset`) и цикл начинается

снова. Этот этап продолжается до тех пор, пока хотя бы один из модулей не вернул `kFALSE` в `MTask::Process`.

3. Постобработка.

Перед завершением цикла событий выполняется постобработка. Она осуществляется методом `MTask::PostProcess`. Постобработка используется для работы с данными, уже прошедшими анализ. Если хотя бы один из модулей вернул `kFALSE` в `MTask::PostProcess`, то постобработка прерывается.

3.3 Архитектура BARS

BARS представляет собой расширение MARS для задач Baikal-GVD. BARS - это набор контейнеров и модулей MARS, макросов обработки данных с использованием этих контейнеров, а также банк данных с информацией о конфигурации телескопа. К информации о конфигурации телескопа относятся, в частности, калибровочные таблицы, разметочные таблицы гирлянд, чувствительности ФЭУ и т. д.

Общая архитектура BARS представлена на Рис. 3.3. В основе пакета обработки лежит ядро MARS. Оно практически не модифицировано, не считая незначительных изменений, необходимых для сборки библиотеки под ROOT 6. Как и в MARS, ядро используется для управления потоком обработки, журнализации, высокоуровневого доступа к файловой системе, а также предоставляет родительские классы (`MTask` и `MParContainer`) для модулей и контейнеров BARS. Классы MARS также используются для чтения и записи ROOT-файлов, хотя для частных случаев в BARS реализованы их наследники.

На основе базовых классов, представленных в ядре, построен второй уровень BARS - контейнеры и модули, предназначенные для хранения и обработки данных Baikal-GVD. Примеры контейнеров BARS:

1. Отклик кластера на регистрацию физического события. Этот контейнер содержит информацию об сработавших каналах, амплитудах, зарядах и временах зарегистрированных импульсов.
2. Геометрия кластера. В этом контейнере содержится информация о координатах ОМ в момент события и их ориентации.

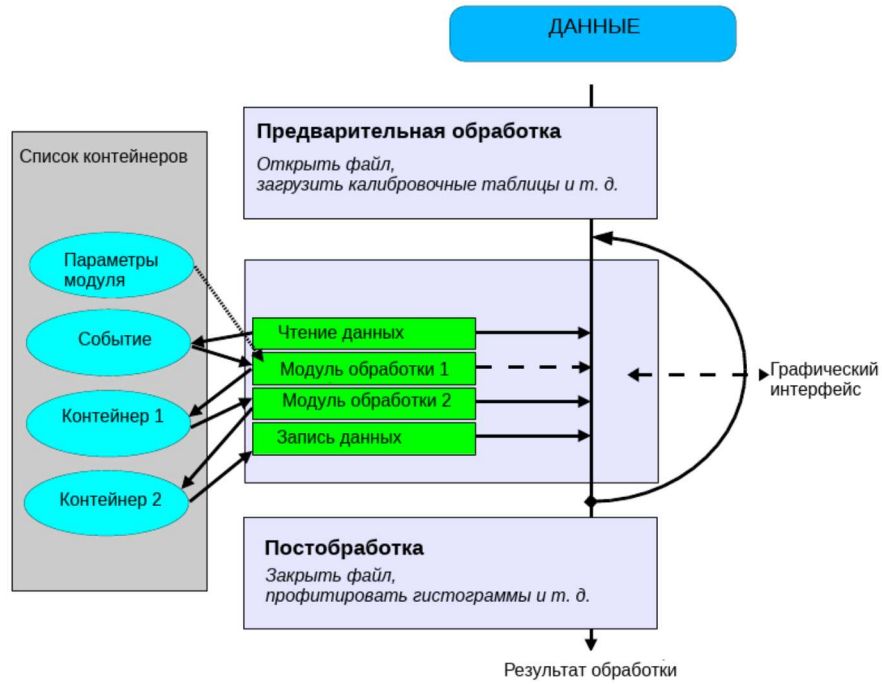


Рисунок 3.2 — Принцип работы цикла событий MARS

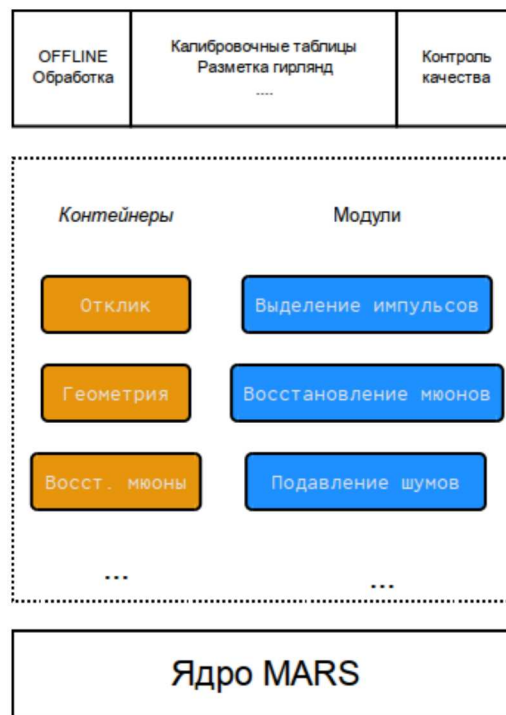


Рисунок 3.3 — Архитектура BARS

3. Калибровочные таблицы ОМ, содержащие информацию о временных задержках каналов установки, а также их зарядовых и амплитудных калибровочных коэффициентах.
4. Мониторные данные ОМ.
5. Шумовая маска отклика, содержащая информацию о том, какие из сработавших каналов установки сработали от шумов.
6. Конфигурация сеансов работы установки (пороги, время запуска и окончания рана и т.д.).
7. Восстановленные мюонные траектории.
8. Параметры восстановления.

Примеры модулей BARS:

1. Выделение импульсов на дорожках сработавших каналов.
2. Подавление шумов.
3. Вычисление геометрии установки.
4. Вычисление калибровочных коэффициентов.
5. Внесение калибровочных правок в отклик установки.
6. Восстановление мюонной траектории по отклику.

Несмотря на общее ядро и единый механизм управления анализом данных, подход к обработке экспериментальных записей в MARS и BARS различается. Отличительной чертой MARS является обработка и визуализация поступающей от детектора информации в реальном времени. В настоящий момент, BARS не имеет графического интерфейса, а автоматическая обработка поступающих данных в BARS отличается от MARS и реализована независимо от соответствующих компонентов MARS. Вместо этого, раз в сутки выполняется предварительная обработка накопившихся данных. В предварительную обработку входит разархивирование и чтение бинарного вывода установки, выделение импульсов в мастерных записях и сохранение результатов в готовые для последующего анализа ROOT-файлы (см. Рис 3.4). После предварительной обработки, каждому сеансу работы установки соответствует следующий набор файлов:

1. RUNID.raw.commutator.root - состояние коммутаторов питания установки.
2. RUNID.raw.config.root - конфигурация сеанса. Конфигурация сеанса включает в себя информацию о номере сеанса, времена запуска и останова набора данных, триггерные условия и т. д.
3. RUNID.raw.errors - сообщения об ошибках.

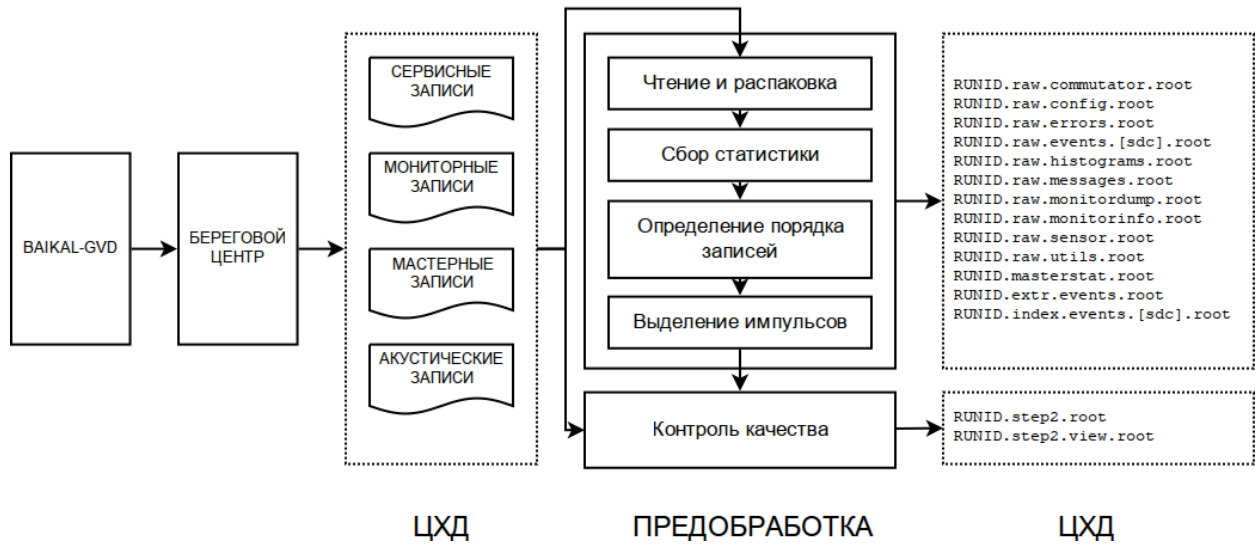


Рисунок 3.4 — Предварительная обработка в BARS

4. `RUNID.raw.events.SDCID.root` - мастерные записи для мастера с номером SDCID.
5. `RUNID.raw.histograms.root` - мониторные гистограммы.
6. `RUNID.raw.messages.root` - информационные сообщения.
7. `RUNID.raw.monitordump.root` - вывод мониторинга шумов.
8. `RUNID.raw.sensor.root` - информация от сенсоров.
9. `RUNID.raw.utils.root` - конфигурация вспомогательных устройств.
10. `RUNID.masterstat.root` - статистика по мастерам.
11. `RUNID.extr.events.root` - извлечённые импульсы.

Глава 4. Подготовка данных в Baikal-GVD

Данные, собранные оптическими модулями, отправляются на центр кластера, а затем пересылаются на берег по донному оптическому каналу. На берегу данные проходят предварительную обработку и архивируются для передачи в центр хранения данных (ЦХД) в Дубне. Для кластера с 2 секциями на гирлянде и парным триггером с порогами 1.5/4 ф.э. объём данных, накопленных за сутки, составляет около 15GB.

Результатом регистрации событий кластером Baikal-GVD является набор кадров АЦП, объединённых в мастерные записи. Такие данные не готовы для выделения, восстановления и физического анализа. Эта глава описывает подготовку данных - обработку мастерных записей, необходимую для последующей работы с событиями. Подготовка данных включает в себя следующие задачи:

1. Определение параметров импульсов по мастерным записям.
2. Калибровку выделенных импульсов по времени, заряду и амплитуде.
3. Объединение мастерных записей с различных секций установки в единое событие, соответствующее регистрации мюона или каскада.
4. Определение положений фотодетекторов в момент события.
5. Приведение экспериментальных событий к единому формату с модельными данными.
6. Подавление шумовых импульсов.

Рассмотрим перечисленные задачи подробнее.

Выделение черенковского сигнала на дорожке АЦП выполняется в 3 этапа. На первом этапе определяются среднее значение и разброс значений пьедестала. Для этого строится распределение значений бинов АЦП, из которого затем выделяется пик пьедестала. Непосредственно выделение импульсов происходит на втором этапе. За импульсы принимаются непрерывные участки дорожки, на которых значение бинов АЦП выше пьедестала. Наконец, для каждого импульса вычисляются численные характеристики:

1. Максимальная амплитуда сигнала относительно пьедестала.
2. Заряд сигнала, полученный суммированием амплитуд всех отсчётов, выше порога регистрации.
3. Длительность сигнала на уровне порога.
4. Длительность сигнала на уровне половины высоты.

5. Временная метка - время сигнала на половине высоты.

Значение временной метки может меняться в зависимости от амплитуды сигнала. Эта зависимость была установлена в лабораторных условиях, путём измерения разности времён между светодиодными сигналами различной амплитуды. Результаты измерений показывают, что отклонение значения временной метки достигает 3 нс.

На следующих этапах обработки импульсы описываются только перечисленными параметрами, а форма сигнала не используется.

Полученные на этапе выделения импульсов численные характеристики сигналов на сработавших каналах представлены в отсчётах АЦП. Для импульсов, не входящих в насыщение, значения амплитуды и заряда пропорциональны числу фотоэлектрон, сформировавших импульс. Вычисление зарядовых коэффициентов (зарядовая калибровка) происходит до обработки монных данных. Для этого проводятся специальные сеансы с принудительным триггером, по данным которых для каждого канала строятся зарядовые спектры. В силу того, что в установке преобладают однофотоэлектронные шумы, в области отсчётов, соответствующих импульсу с однофотоэлектронным зарядом, будет наблюдаться пик. Положение этого пика принимается за зарядовый коэффициент. Амплитудные коэффициенты получаются аналогичным образом по амплитудным спектрам каналов.

Временные характеристики каналов, полученные при выделении импульсов, тоже представлены в отсчётах АЦП. В отличие от амплитуды и заряда, один временной отсчёт АЦП соответствует 5 нс на всех каналах установки. Однако, временные задержки в АЦП, ОМ и другие факторы приводят к временному сдвигу дорожек каналов относительно кадра АЦП. Поэтому, так же, как и в случае с зарядовыми и амплитудными калибровочными коэффициентами, перед обработкой мюонных данных необходимо вычислить временные сдвиги для всех каналов установки. Подробное описание причин возникновения временных сдвижек каналов и методов их определения будет приведено далее в этой главе.

Таким образом, на втором этапе подготовки данных численные характеристики импульсов корректируются с учётом амплитудных, зарядовых и временных калибровочных коэффициентов.

На третьем этапе подготовки данных выполняется объединение мастерных записей. Мастерные записи поступают в центр кластера независимо. Это

означает, что для формирования отклика всей установки необходимо определить, какие мастерные записи были сформированы сигналом “запрос” из центра кластера и объединить их. В простейшем случае эта задача решается сопоставлением счётчиков срабатываний секций, указанных в мастерных записях. В том случае, если по каким-то причинам триггерные счётчики секций расходятся, объединение событий выполняется с помощью анализа временных интервалов между мастерными записями.

Полученному после объединения мастерных записей событию сопоставляется временная метка, характеризующая время регистрации и соответствующая времени срабатывания первой секции события. Когда время события определено, становится возможным вычислить координаты каналов в момент регистрации. Вычисление геометрии установки осуществляется по координатам акустических маяков, измеренным в фиксированные моменты времени. Маяки расположены под нижней секцией, между секциями и под верхним каналом верхней секции гирлянды. Положение ОМ определяется интерполяцией разметки гирлянды между маяками. Подробное описание системы акустического позиционирования Baikal-GVD, а также методов вычисления координат ОМ представлено в пункте 4.3.

После того, как экспериментальное событие сформировано и откалибровано, оно преобразуется к единому формату с модельными событиями. Экспериментальная информация, не порождаемая моделированием (например, ширина импульсов), выносится в отдельные, опциональные структуры данных. Аналогично обрабатывается информация, уникальная для модельных событий (например, флаг шумовых импульсов). Единое представление события - это набор импульсов, для каждого из которых указаны номер канала, заряд и время срабатывания. Такой подход позволяет, начиная с этого этапа обработки данных, обращаться с модельными и экспериментальными данными одинаково. Это позволяет оценивать эффективность методов подавления шумов, выделения и восстановления событий, используя те же программные средства, которые применяются для этих задач на практике.

Последним этапом подготовки данных является подавление шумов. В зависимости от задач, методы подавления шумов, применяемые в Baikal-GVD можно разделить на 3 класса:

- Простые каты по параметрам импульсов. Так как в установке преобладают однофотоэлектронные шумы, выставление зарядового порога в 2 фотоэлектрона позволяет существенно снизить уровень шума.
- Фильтрация триггерными окнами.
- Фильтрация импульсов по причинности. Этот механизм использовался в NT-200, а также применяется с различными вариациями в ANTARES, KM3Net и аналогичных установках.

4.1 Типы данных

Кластер Baikal-GVD передаёт на берег данные от секций установки. Управляющая программа кластера преобразует эти данные в три класса данных: мастерные записи, мониторные данные и сервисные записи. Система гидроакустического позиционирования и дополнительные калибровочные системы работают независимо от основной управляющей программы, их данные хранятся отдельно от результатов регистрации ФЭУ. Подробнее использование акустических записей будет описано в пункте 4.4. Сервисные записи содержат информацию о состоянии установки:

1. Статическая конфигурация установки. К ней относятся, в частности:
 - a) Число кластеров детектора.
 - b) IP-адреса элементов установки (например, мастерных плат модулей секции).
 - c) Соответствие секций гирляндам. Эта информация позволяет определить, к какой гирлянде относится заданная секция.
2. Динамическая конфигурация установки. К ней относятся, в частности:
 - a) Номер текущего сеанса.
 - b) Конфигурация триггера (вид триггера, пороги и ширина триггерного окна).
 - c) Конфигурация ОМ (питание, порог регистрации, конфигурация калибровочных светодиодов).

Мониторные данные содержат информацию о состоянии каналов во время работы установки. Мониторинг отслеживает следующие параметры ОМ:

1. Темпы счёта шумов. Экспериментально полученные темпы счёта используются при моделировании отклика установки, необходимого для эффективного выделения и восстановления мюонных событий. Так как основной источник низкоамплитудных шумовых сигналов Baikal-GVD - хемилюминисценция - подвержен значительным колебаниям [62], то необходим постоянный мониторинг темпов счёта; использование фиксированных значений приведёт к искажению модельных данных.
2. Высоковольтное напряжение ОМ (HV) и питание электроники ОМ.
3. Порог регистрации ОМ.
4. Температура внутри ОМ.
5. Амплитудные распределения зарегистрированных сигналов.

Наконец, мастерные записи состоят из набора кадров АЦП, полученных от одной секции установки, по кадру на канал. Продолжительность каждого кадра составляет 5 мкс; амплитуда сигнала в кадре представлена в отсчётах АЦП. Мастерная запись формируется при выполнении на секции триггерного условия, либо при поступлении на секцию сигнала “подтверждение” в синхронном режиме работы установки. Кроме кадров АЦП, мастерные записи также содержат текущее значение триггерного счётчика секции. Так как мастерные записи, сформированные в синхронном режиме, поступают на берег неупорядоченно, значение триггерного счётчика позволяет определить, какие мастерные записи были сформированы общим триггером.

4.2 Контроль качества данных

Помимо предварительной обработки, в BARS также автоматически выполняется контроль качества набранных данных. Под контролем качества подразумевается вычисление параметров работы основных структурных элементов установки (кластера, гирлянды, секции и ОМ). Сравнение полученных выборок с теоретическими распределениями позволяет обнаружить и правильно диагностировать аномальное поведение установки во время сеанса. Например, одним из параметров, используемых для контроля качества, является разность времён регистрации последовательных событий секцией RateExponent. Если поток регистрируемых событий пуассоновский, то распределение RateExponent



Рисунок 4.1 — Измерительный канал Baikal-GVD

экспоненциальное. В этом случае, качество работы секции в сеансе определяется точностью аппроксимации экспериментальной выборки RateExponent экспоненциальным распределением.

Контроль качества выполняется одновременно с обработкой.

4.3 Калибровка измерительных каналов

Каналы глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD предназначены для измерения времени регистрации и зарядов сигналов, которые образуются при прохождении заряженной частицы через рабочий объем установки. Измерительный канал состоит из следующих основных элементов (см. Рис. 4.1): фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), регистрирующего черенковское излучение заряженных частиц; усилителя сигналов ФЭУ(Кус14); глубоководного коаксиального кабеля РК50, по которому усиленный сигнал передается в блок оцифровки сигналов; аналого-цифрового преобразователя (АЦП), преобразующего сигнал в цифровую форму.

Калибровка каналов в целом и их составных элементов необходима для преобразования параметров сигналов (заряда импульса и времени его регистрации, измеренных при помощи сканирующего АЦП) в интенсивность (амплитудная калибровка) и время регистрации (временная калибровка) потока черенковских фотонов фотоэлектронным умножителем.

4.3.1 Калибровка кабельных коммуникаций

Важной составной частью измерительного канала ОМ является 90-метровый гибридный глубоководный кабель КСТ (РК50+90.15) производства фир-

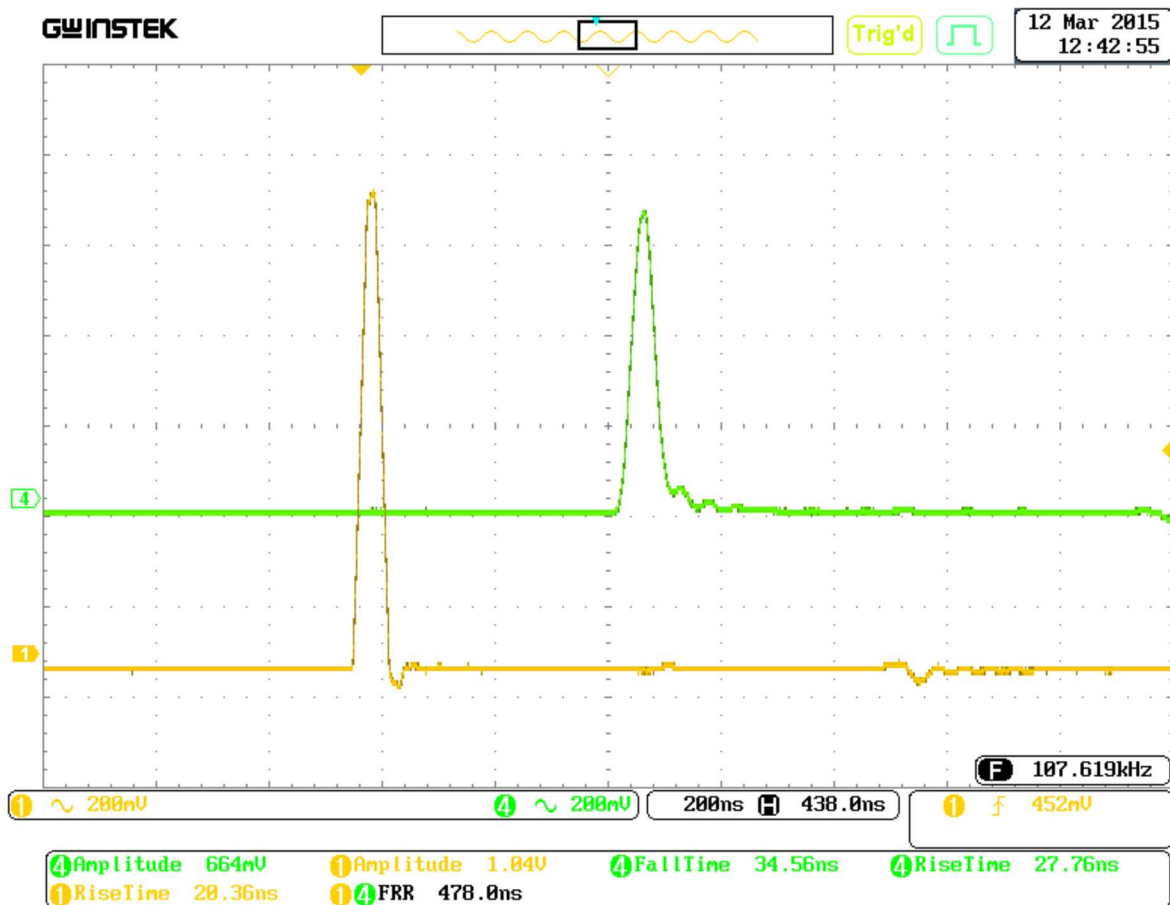


Рисунок 4.2 — Пример осциллограмм входного и выходного сигналов, полученных при измерении параметров кабеля

мы ООО “Псковгеокабель”, соединяющий ОМ и центральный модуль секции, в котором размещаются блоки АЦП. В состав кабеля входит коаксиальный проводник РК50 и девять жил для электропитания и управления работой ОМ. Калибровка кабельных коммуникаций заключается в измерении кабельных задержек и коэффициентов ослабления сигналов при прохождении через кабель. Калибровочные измерения проводились в лабораторных условиях при помощи цифрового осциллографа GDS-73254 (полоса пропускания 250 МГц) и генератора Rigol DG 4062. Сигнал с выхода генератора (длительность 40 нс, фронты 20 нс, амплитуда 1 Вольт) подавался на вход кабеля, параметры выходного сигнала измерялись при помощи осциллографа. На Рис. 4.2 представлены осциллограммы входного и выходного сигналов, по которым производятся измерения параметров кабеля.

В таблице 2 представлен пример результатов измерений параметров кабелей: амплитуды сигнала после прохождения кабеля (A_{out}), параметров перед-

Таблица 2 — Пример измерения параметров кабельных коммуникаций каналов

№	A_{in} , мВ	A_{out} , мВ	Передний фронт
	Задний фронт	Задержка, нс	
1-15	1000	640	28.8
34.4	462		
2-15	1000	544	25.8
37.3	457		
3-15	1000	648	28.3
35.1	461		

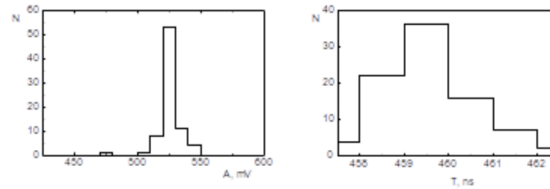


Рисунок 4.3 — Распределение кабелей по величине выходного сигнала

него и заднего фронта (на уровнях амплитуды 10 – 90%) и кабельных задержек (задержка сигналов измерялась на полувысоте импульса).

Основными параметрами кабеля являются ослабление и задержка сигналов. Распределение кабелей по этим параметрам представлено на Рис. 4.3. Ослабление сигнала длительностью 40 нс составило величину около 0.53 для данной партии из 100 кабелей (следует отметить, что ослабление в кабеле для других партий составило ~ 0.7). Разброс по величине кабельных задержек определяется точностью измерения длины кабеля при его изготовлении и имеет характерную величину ~ 2 нс (при величине задержки коаксиального кабеля ~ 5 нс/м, это соответствует точности измерения длин кабелей ~ 40 см).

Результаты калибровки кабелей заносятся в банк калибровочных данных и впоследствии могут использоваться при калибровке каналов.

4.3.2 Амплитудная калибровка каналов

Амплитудная калибровка каналов основана на хорошо известной методике измерения одно-фотоэлектронных (о.ф.э.) спектров – амплитудных распределений, полученных в режиме регистрации единичных фотоэлектронов. В результате обработки о.ф.э. спектров определяется величина заряда фотоэлектрона, измеренная в кодах АЦП, (q_{1e}). Параметр q_{1e} называется амплитудным калибровочным коэффициентом и используется для определения количества фотоэлектронов, образовавших зарегистрированный импульс. Для вычисления потока черенковских фотонов, падающего на фотокатод ФЭУ, используется информация о его квантовой чувствительности. Измерение квантовой чувствительности фотокатодов производит фирма Hamamatsu (производитель ФЭУ R7081-100) для поставляемых фотоэлектронных умножителей.

Для измерения о.ф.э. спектров 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 проведения измерений о.ф.э. спектров их интенсивность подбирается таким образом, что бы вероятность выбивания фотоэлектрона (ф.э.) из фотокатода не превышала 10% (так называемый одноэлектронный режим работы канала). Учитывая пуассоновский характер распределения количества ф.э., доля много-фотоэлектронных импульсов в амплитудном спектре при такой интенсивности вспышек светодиодов составляет величину около 5%. Именно такой метод используется при лабораторной калибровке оптических модулей. Однако подбор интенсивности свечения светодиодов, обеспечивающий одноэлектронный режим работы каналов, является достаточно время-затратной процедурой. Существенно проще в качестве калибровочного источника света использовать естественное свечение байкальской воды. Источником такого свечения является хемилюминесценция (свечение разлагающихся бактерий), и оно 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 “внеш-

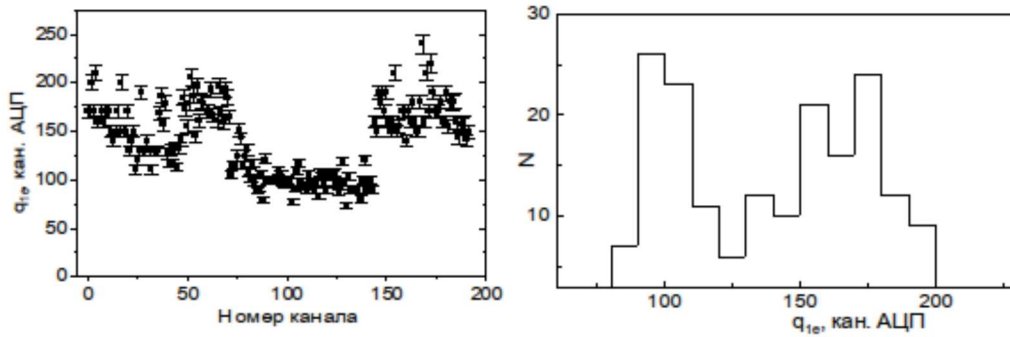


Рисунок 4.4 — Вычисленные амплитудные калибровочные коэффициенты каналов q_{1e} установки 2014 года (слева) и распределение каналов по величине q_{1e} (справа)

него” источника, независимо от срабатываний каналов. При поступлении триггерного сигнала на плату АЦП на всех ее каналах формируются временные кадры длительностью 5 мкс. При средних темпах срабатываний каналов, вызванных свечением воды, около 25 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.

Обработка полученных о.ф.э. спектров заключается в определении положения о.ф.э. пика. Для этого о.ф.э. пик фитируется распределением Гаусса в области максимума.

Результаты вычисления амплитудных калибровочных коэффициентов q_{1e} для установки 2014 года представлены на Рис. 4.4. Возникновение двух пиков в распределении каналов по величине q_{1e} объясняется использованием плат АЦП разных типов. До 2014 года в детекторе были установлены 4-х каналные платы АЦП, в которых использовались одноканальные микросхемы аналого-цифровых преобразователей. Дополнительные каналы установки, смонтированные в оз. Байкал в 2014 году, использовали 12-канальные платы с шестью двойными АЦП. Поскольку переход на 12-ти каналные платы позволил существенно снизить уровень электронных шумов каналов, чувствительность АЦП была снижена. Поэтому, при фиксированном коэффициенте усиления всех каналов 108, величины амплитудных калибровочных коэффициентов для новых каналов примерно в полтора раза меньше.

4.3.3 Временная калибровка каналов

Для восстановления времени регистрации потока черенковских фотонов, падающих на фотокатод ФЭУ, по времени прихода импульса на вход АЦП можно использовать информацию о задержках сигнала в ФЭУ (T_{PMT}) и в кабеле (T_{CAB}), соединяющем оптический и центральный модули секций. Однако, существует более прямой способ калибровки, учитывающий вклад задержек всех составных элементов каналов. В этом подходе используется светодиодная калибровочная система ОМ. Каждый оптический модуль оснащен двумя светодиодами (Kingbright L7117), генерирующие вспышки света длительностью около 5 нс в угловом диапазоне $2\Theta_{1/2} = 16^\circ$, интенсивность которых может регулироваться в диапазоне от 1 до ~ 108 фотонов. Светодиодные калибровочные источники устанавливаются на контроллер ОМ и ориентированы в направлении, противоположном фотокатоду ФЭУ. Такая ориентация светодиодов позволяет регистрировать их сигналы как ФЭУ, расположенном в модуле со светодиодом, так и ФЭУ, расположенном выше на гирлянде (см. Рис. 4.5). Свет на верхний ФЭУ распространяется через воду, на нижний ФЭУ – через стеклянный корпус оптического модуля, который выступает в роли волновода. Пример временных кадров с двух соседних каналов, полученных при регистрации вспышки светодиодов, представлен на Рис. 4.5. Следует отметить, что амплитуды сигналов, измеренные на соседних каналах близки, что исключает влияние амплитудного эффекта (зависимости времени регистрации от амплитуды сигнала) на результаты калибровки.

Для определения относительных временных сдвижек соседних каналов (T_{SHIFT}) вычислялось время между импульсами dT (измерение времени сигнала осуществлялось на половине высоты) и сравнивалось с ожидаемым временем, вычисленным исходя из расстояния между оптическими модулями и скорости распространения света в байкальской воде. На Рис. 4.6 представлены временные сдвигки между каналами T_{SHIFT} , измеренные для установки 2014 года. Временные сдвигки вычислялись независимо для каждой секции ОМ (12 оптических модулей). Первый (нижний) канал секции выбирался в качестве базового, относительно которого определяются временные смещения T_{SHIFT} остальных каналов. Ошибка вычисления T_{SHIFT} для каждой пары составляет величину около 1 нс. Последовательное определение T_{SHIFT} по парам

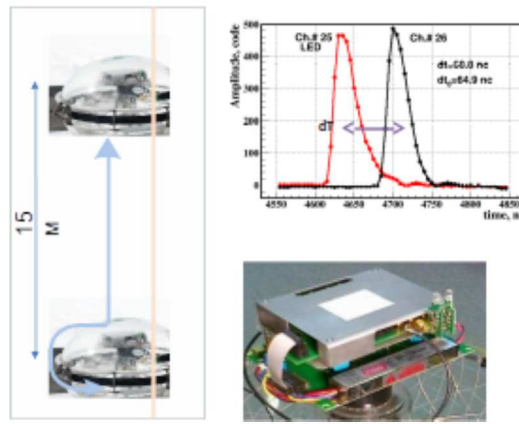


Рисунок 4.5 — Блок электроники ОМ, установленный на цоколь ФЭУ, оснащенный двумя калибровочными светодиодными источниками света; схема временной калибровки при помощи светодиода; временные кадры, зарегистрированные на АЦП соседних каналов.

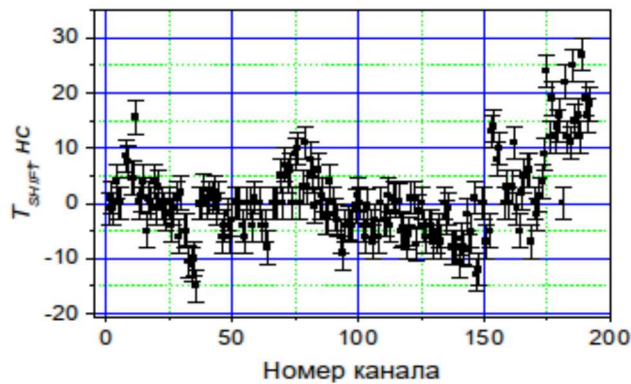


Рисунок 4.6 — Результаты временной калибровки каналов установки 2014 года.

каналов приводит к накоплению ошибок при вычислении калибровочных коэффициентов. Это приводит к тому, что суммарная ошибка временной калибровки каналов данным методом составляет величину около 3 нс. Характерный диапазон значений T_{SHIFT} для разных каналов составляет величину 10 нс. Различие в длине кабелей дает разброс задержек существенно меньше 10 нс. Основной эффект обусловлен различием задержек ФЭУ. Для того, что бы обеспечить одинаковый коэффициент усиления каналов (10^8) для каждого ФЭУ подбирается индивидуальное значение напряжения на делителе. Различие в напряжениях ФЭУ (от 1100 В до 1800 В) приводит к различию их задержек: при увеличении напряжения на 100 В задержка уменьшается примерно на 2.2 нс.

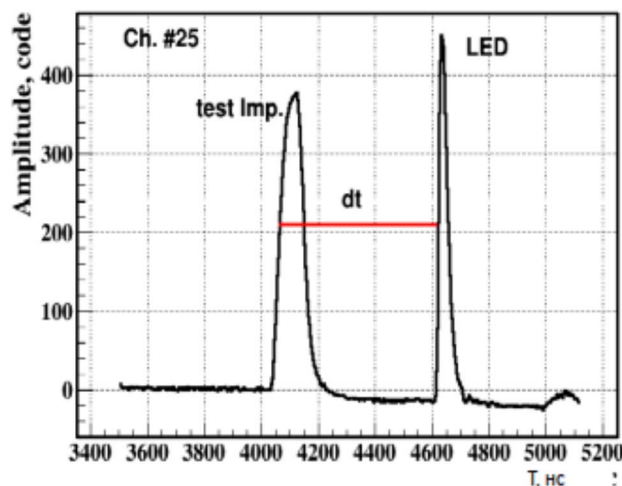


Рисунок 4.7 — Временной кадр с тестовым импульсом и сигналом с ФЭУ от светодиода (сигнал запуска светодиода задержан на ~ 500 нс).

Для контроля полученных временных калибровочных коэффициентов производилась выборочные измерения задержек каналов. Как указывалось выше, задержка канала включает в себя кабельную задержку и задержку ФЭУ. Кабельные задержки для всех каналов были измерены в лабораторных условиях. Задержки ФЭУ измерялись в натуральных условиях. Для этого на установке проводились специальные серии калибровочных измерений. На каждом канале включался светодиодный калибровочный источник и так называемый генератор тестовых импульсов. Время генерации тестового сигнала и сигнала запуска светодиода синхронизировано. На выходе каждого канала наблюдается два сигнала: сигнал с ФЭУ от светодиода и тестовый импульс (см. Рис. 4.7).

Сигнал от светодиода задержан в ФЭУ, в то время как тестовый импульс поступает на выход канала минуя фотоэлектронный умножитель. Для определения задержки ФЭУ измеряется время dt между этими сигналами. На Рис. 4.8 представлена разность между задержками каналов, полученными при помощи светодиодной калибровки (dT_{LED}) и с использованием тестового импульса (dT_{TST}). Различие между временными сдвигами, полученными независимыми методами, составляет величину ~ 2 нс.

Методика временной калибровки, описанная выше, позволяет определить временные сдвиги каналов независимо для каждой секции установки. Для того, что бы определить временные сдвиги между секциями расположенными на одной гирлянде использовался аналогичный подход: светодиод верхнего

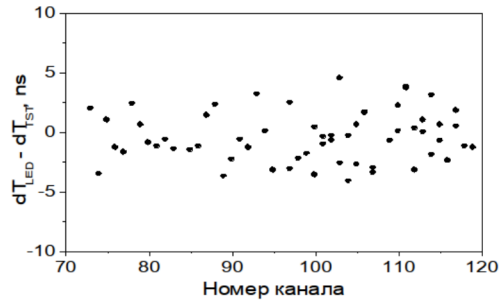


Рисунок 4.8 — Разность между задержками каналов, полученными при помощи светодиодной калибровки (dT_{LED}) и с использованием тестового импульса (dT_{TST}) в зависимости от номера канала.

оптического модуля нижней секции засвечивал “свой” ФЭУ и ФЭУ оптического модуля, расположенного внизу верхней секции, что позволяло определить относительную временную сдвигку между секциями.

Для временной калибровки секций, расположенных на разных гирляндах, использовался несколько другой подход. Оптические модули разных секций “подсвечивались” калибровочным источником света, состоящим из 12 светодиодов, расположенных в отдельном глубоководном корпусе (матрицей светодиодов). Шесть светодиодов в источнике были направлены вверх, обеспечивая подсветку ОМ, расположенных на гирлянде, на которой размещается матрица. Шесть светодиодов были ориентированы в горизонтальном направлении (угол между соседними светодиодами 60°), засвечивая ОМ соседних гирлянд. Место размещения светодиодной матрицы показано на Рис. 4.9.

Для определения координат светодиодной матрицы и оптических модулей использовались данные, полученные при помощи акустической системы позиционирования. Относительные временные сдвигки секций определялись как разность между ожидаемыми (dT_{EXP}) и измеренными (dT) временными задержками между сигналами, зарегистрированными на каналах, расположенных в разных секциях. Рис. 4.10 иллюстрирует методику определения временных сдвижек dT_{SEC} на примере верхних секций 2-ой и 8-ой гирлянд. Для вычисления dT_{SEC} 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 $(T - T_0)_{EXP}$. На графике, расположенном в правой части Рис. 4.10, представлена разность

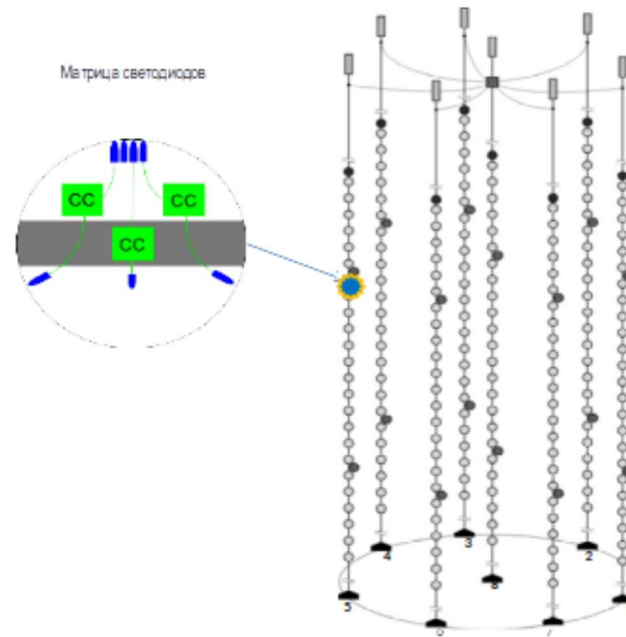


Рисунок 4.9 — Размещение светодиодной матрицы в установке 2014 года.

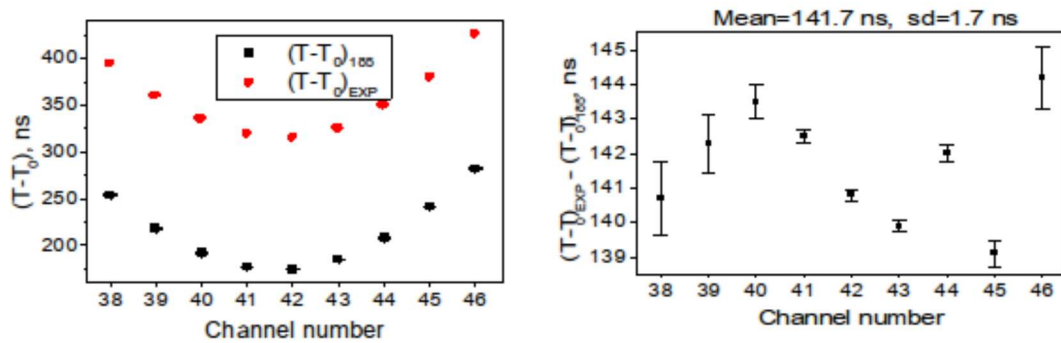


Рисунок 4.10 — Измеренные $(T - T_0)_{185}$ и рассчитанные $(T - T_0)_{EXP}$ временные задержки между каналами, расположенными на разных гирляндах (слева) и величина временной сдвижки между секциями, измеренная по разным парам каналов.

между ожидаемыми и измеренными задержками каналов. Минимальное отклонение расчетных задержек от измеренных получается при временной сдвижке между секциями 142 нс (среднеквадратичное отклонение 1.7 нс).

Полученная временная сдвижка между секциями 142 ± 2 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 определе-

ния временной сдвижки между секциями включает в себя ошибки временной калибровки межканальных сдвижек.

4.4 Определение положений фотодетекторов в момент события.

В Байкальской воде ошибка в положении оптического модуля на 1 м эквивалентна временной сдвижке сигнала в 4.6 нс. В то же время, смещение оптического модуля на гирлянде может достигать 10 м. в течение одного сеанса (см. Рис. 4.11). Ожидаемая точность временной калибровки в составляет порядка 2 нс, поэтому точное определение координат ОМ во время регистрации события представляет исключительную важность. В Baikal-GVD, как и в более ранних Байкальских нейтринных телескопах, эта задача решается с помощью акустического позиционирования. Этот подход подразумевает установку на детекторе сети гидроакустических эмиттеров и приёмников, расположенных, соответственно, на неподвижных и свободных элементах установки. Задержка сигнала на приёмнике от нескольких эмиттеров позволяет определить координаты приёмника и восстановить геометрию детектора.

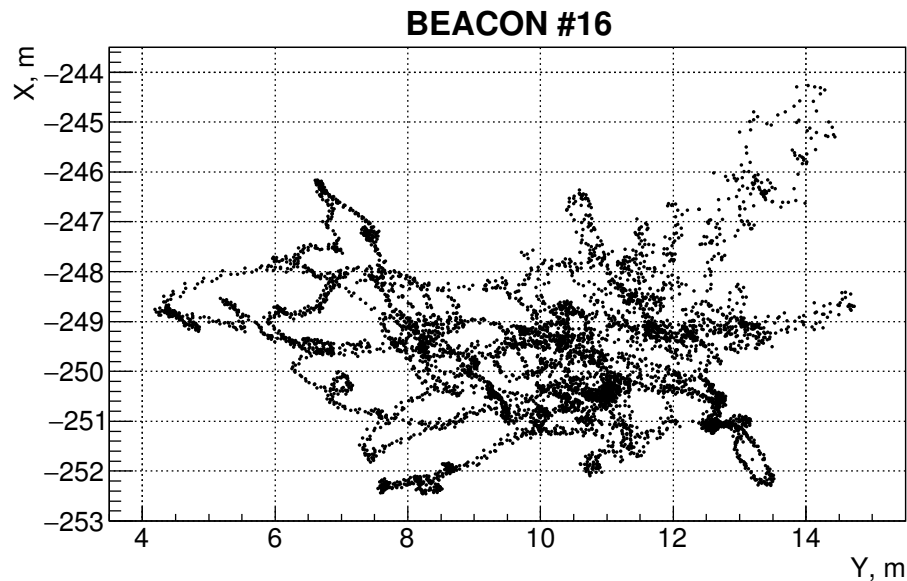


Рисунок 4.11 — Координаты верхнего акустического модуля гирлянды 2 кластера “Дубна”. Сеанс 556, 2015.

В Baikal-GVD за акустическое позиционирование отвечают два независимых компонента: ГАСИК и EvoLogic. ГАСИК, аналог которого был установлен на НТ-200, разрабатывается в Иркутском государственном университете. В настоящий момент ГАСИК находится в стадии разработки и не используется для определения положений оптических модулей. Вместо ГАСИК используется система акустического позиционирования EvoLogic [63].

Система EvoLogic - это сеть глубоководных гидрофонов, расположенных вдоль гирлянд кластеров Baikal-GVD (см. Рис 4.12). Гидрофоны функционально идентичны друг другу, но используются в двух различных ролях: маяков и нодов. Ноды расположены у дна озера, а маяки вдоль кластера: под нижней секцией, между секциями и под верхним оптическим модулем верхней секции гирлянды. Поскольку ноды расположены у неподвижного якоря гирлянды (на некоторых гирляндах ноды крепятся прямо на якорь), их координаты считаются неизменными, а сами ноды используются в качестве эмиттеров ультразвуковых волн. Задержки прихода сигналов от нодов установки до отдельного маяка позволяют определить наклонные дальности между маяком и нодами, а по ним восстановить координаты маяков.

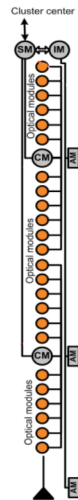


Рисунок 4.12 — Схема системы сбора данных гирлянды GVD. AM - акустические модемы, SM - модули секции, SM - модуль гирлянды.

С заданной периодичностью (приблизительно раз в 40 секунд) с берега выполняется последовательный опрос гидрофонов и восстановление их пространственных координат. На берегу, результаты восстановления записываются текстовые measurements-файлы, состоящие из записей, сопоставляющих маяку на-

бор координат для заданного момента времени. Раз в сутки, файлы передаются в ЦХД в Дубне.

4.4.1 Предварительная обработка акустических данных

Использовать эти данные при работе с событиями напрямую нельзя, так как опрос маяков выполняется последовательно и не синхронизирован с триггером установки. В то же время при обработке события в цикле событий BARS предпочтительно знать интерполированную геометрию кластера перед восстановлением. По этим причинам, `measurement*` файлы сначала проходят предварительную обработку, в результате которой получается `root`-файл с “выровненной” геометрией (интерполированными конфигурациями акустических маяков, расположенных через равные промежутки времени). Наследники модуля `BEvoGeomApply` (например, `BEvoGeomApplyLinear`) читают выровненную геометрию и определяют координаты модулей для текущего события в цикле. Время события определяется по `BEExtractedHeader`, полученная полная геометрия установки пишется в `BGeomTel`.

Для описания параметров маяков используются 3 контейнера:

1. `BEvoNodeStaticParams` - статические параметры маяка. В этом контейнере содержатся ID, номер гирлянды, положение маяка на гирлянде и серийный номер маяка.
2. `BEvoNodeDynamicParams` - наследник `BEvoNodeStaticParams`, содержащий результаты восстановления положений маяков. Здесь лежат координаты маяка, погрешности координат и временная метка записи.
3. `BEvoNodeInterpolatedParams` - наследник `BEvoNodeDynamicParams`. Этот контейнер содержит результаты интерполяции положения маяка между физическими измерениями. `BEvoNodeInterpolatedParams` содержит статус интерполяции и время от точки интерполяции до ближайших замеров.

Параметры маяков собираются в конфигурации:

1. `BEvoConfiguration` - массив статических параметров маяков.
2. `BEvoDynamicConfiguration` - наследник `BEvoConfiguration`, но с динамическими параметрами.

3. `BEvoInterpolatedConfiguration` - наследник `BEvoDynamicConfiguration`, но с интерполированными параметрами.

Предварительная обработка акустических данных осуществляется в два этапа:

1. Чтение геометрии нодов (макрос `readEvoNodeData.cc`). Из `measurement*` файла получается `root`-файл с набором деревьев, в каждом дереве лежат `BEvoDynamicParams` для одного нода. Чтение геометрии выполняет модуль `BReadEvoFile`. При инициализации ему необходимо передать статическую конфигурацию нодов.
2. Выравнивание кофигураций нодов (макрос `alignEvoNodeData.cc`). Интервал времени между первой и последней записью в `measurement*`-файле покрывается решёткой с заданным шагом (обычно порядка нескольких минут). Для каждого момента времени, соответствующего узлу решётки, координаты всех нодов интерполируются и пишутся в `BEvoInterpolatedConfiguration`. После этого интерполированные конфигурации записываются в дерево в выходном `root`-файле.

Результат выравнивания акустических записей `fig:align-density` представлен на Рис. 4.13



Рисунок 4.13 — Плотность акустических записей до и после выравнивания

4.4.2 Вычисление геометрии установки

Результатом предобработки акустических записей является `root`-файл, содержащий интерполированные координаты маяков установки через фиксиро-

ванные интервалы времени (обычно, около 2 минут). Определение положений ОМ выполняется на основе этих данных в цикле событий. Для каждого события подбираются две интерполированные конфигурации акустических маяков - до и после события. Из этих конфигураций линейной интерполяцией вычисляется положение маяков во время события. Затем, по полученным данным, выполняется интерполяция (линейная, либо цепной линией) разметки гирлянды на положения маяков. Результатом является контейнер с геометрией установки.

4.4.3 Особенности акустических данных

Как было написано выше, результатом работы системы акустического позиционирования Baikal-GVD является набор записей, каждая из которых содержит информацию о координатах маяка и время, для которого эти координаты восстановлены. В силу особенностей реализации опроса маяков интервалы между записями одного маяка нерегулярны даже при стабильной работе гидроакустической аппаратуры и линий связи. Пробелы в акустических записях можно в общем случае разбить на 3 широких класса:

1. Продолжительные интервалы, захватывающие больше одного сеанса работы установки (сутки, неделя).
2. Краткосрочные пробелы, в пределах одного сеанса работы (несколько часов, см. Рис 4.14)
3. Интервалы, возникшие из-за отказа маяков.

Анализ акустических записей маяков показал, что координаты маяков, расположенных на соседних гирляндах коррелируют друг с другом. Это означает, что течения Байкала смещают гирлянды параллельно друг другу. Такое поведение можно использовать для аппроксимации пропущенных записей.

В BARS для этого был создан модуль BEvoGuessBeaconPosition. Перед обработкой событий BEvoGuessBeaconPosition считывает последнюю известную геометрию установки и вычисляет расстояния между парами параллельных маяков. Во время предварительной обработки акустических записей, BEvoGuessBeaconPosition выполняется каждый раз после выравнивания. Если координаты маяка, полученные в результате выравнивания, получаются в результате интерполяции записей, пробел между которыми больше некоторо-

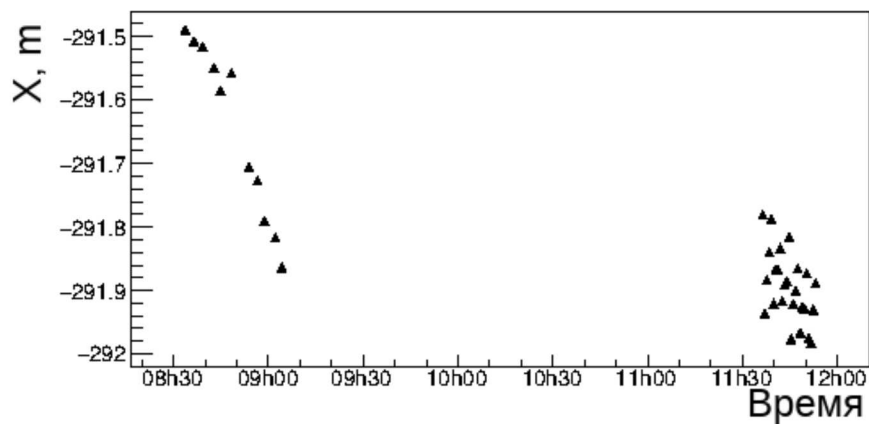


Рисунок 4.14 — Короткий (2.5 часа) пробел в акустических записях маяка №15, 2015 год

го порога (обычно, порог - 15 минут), то BEvoGuessBeaconPosition заменяет интерполированные значения аппроксимацией. Аппроксимированные значения получаются параллельным сдвигом координат рабочего маяка, параллельного данному, на расстояние между рабочим маяком и текущим, считанное ранее. Результат аппроксимации представлен на Рив [4.15](#)

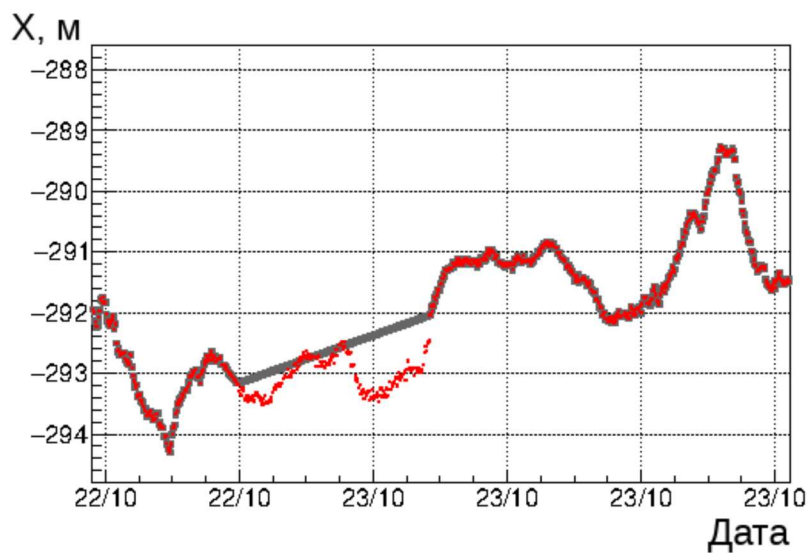


Рисунок 4.15 — пример аппроксимации x-координаты акустического маяка, 2015 год

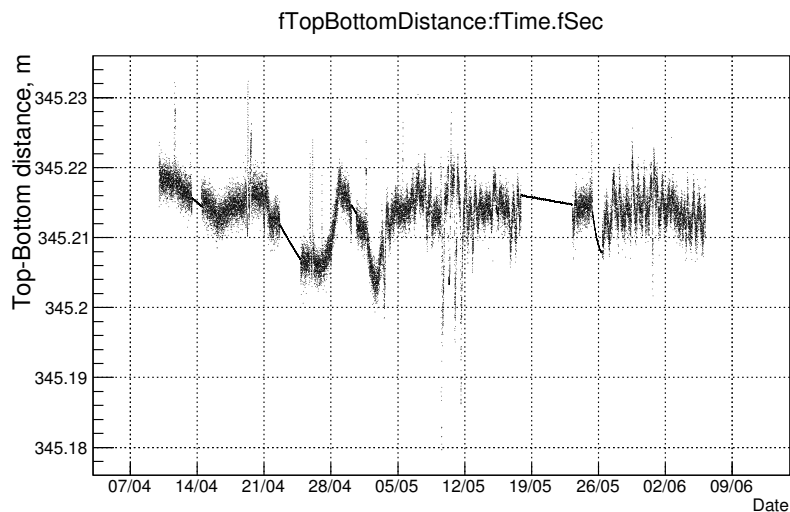


Рисунок 4.16 — Расстояние между верхним и нижним маяками гирлянды №3, 2015 год

4.4.4 Контроль качества акустических данных

Для контроля качества работы системы позиционирования, вычисление координат ОМ может также сопровождаться сбором дополнительных параметров акустической системы, характеризующих её работоспособность. Такой подход к контролю качества позволяет определить случаи, в которых обработка событий велась на основе некорректной акустической информации. Параметры вычисляются для каждого события, независимо для каждой гирлянды. К ним относятся:

1. Среднее расстояние между модулями.
2. Среднее расстояние между верхним и нижним маяками гирлянды (длина кластера).
3. Расстояние до следующей (по часовой стрелке) гирлянды. Расстояние вычисляется как относительно ОМ, так и верхнего и нижнего маяка гирлянды.
4. Расстояние до центральной гирлянды кластера. Расстояние вычисляется как относительно ОМ, так и верхнего и нижнего маяка гирлянды.

На Рис. 4.16 представлен пример зависимости длины кластера от времени.

В Baikal-GVD также реализован онлайн мониторинг плотности акустических записей. Раз в час выполняется анализ свежих акустических записей. В рамках этого анализа выполняется выравнивание записей маяка, после чего процент интерполированных записей, расстояние которых до физических изме-

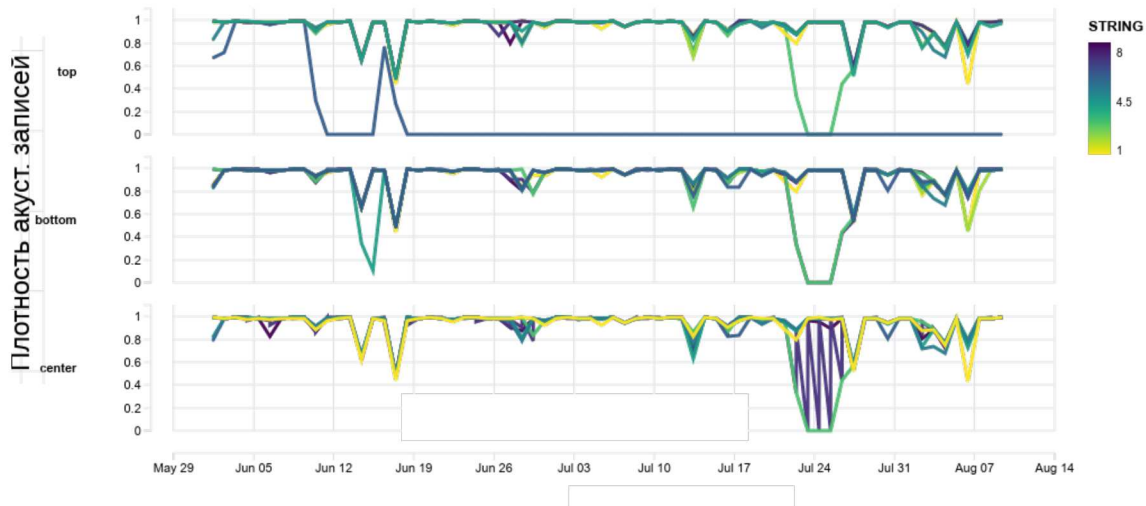


Рисунок 4.17 — Плотность акустических записей, 2016 год

рений составляет не больше 15 минут принимается за плотность записей этого маяка. Значение плотности и соответствующий ей временной интервал заносятся в базу данных в Дубне. График плотности записей доступен через веб-сервис и доступен в реальном времени (см Рис. 4.17).

Такой подход позволяет оперативно выявить сбои в работе акустической аппаратуры. Однако, существенным недостатком является то, что в текущей реализации количество акустических записей нормируется на астрономическое время. Это означает, что периоды неактивности установки также отображаются на плотности записей.

4.4.5 Результаты

Результатом обработки данных акустического позиционирования является набор выровненных координат маяков через равные промежутки времени (обычно это одна минута), а также набор дополнительных параметров акустической системы, характеризующих её работоспособность. Для каждого сеанса работы установки формируется 5 root-файлов:

1. *.evo.beacons.root - Координаты маяков, восстановленные по физическим измерениям, выполненным системой акустического позиционирования во время сеанса.

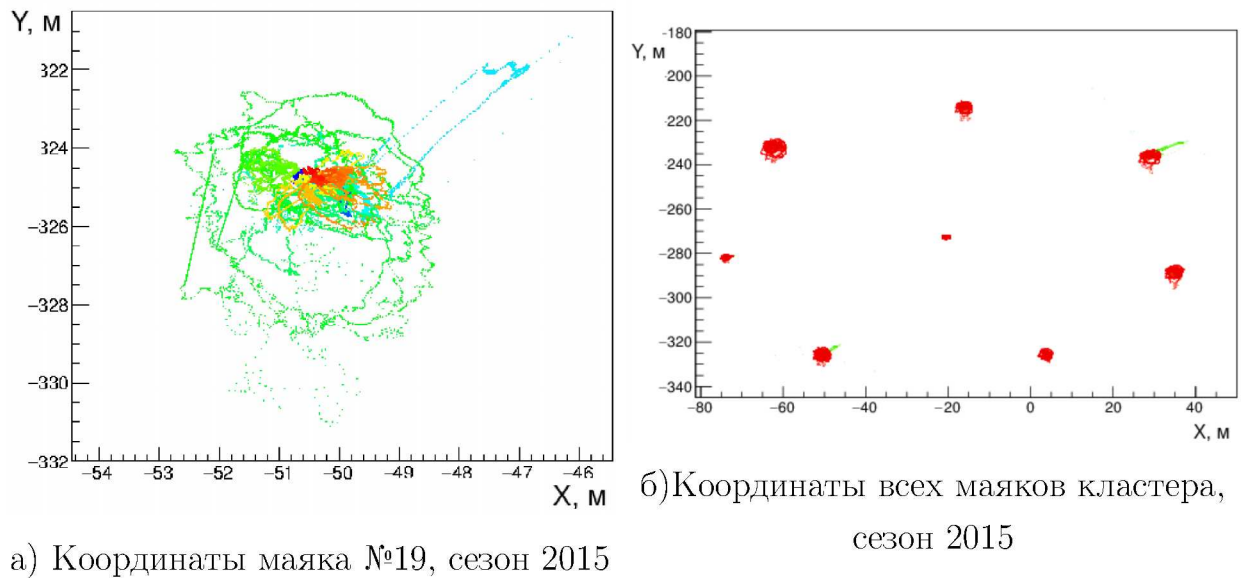


Рисунок 4.18 — Плотность акустических записей до и после выравнивания

2. *.evo.beacons.aligned.root - Координаты маяков, выровненные с заданным временным шагом.
3. *.evo.beacons.aligned.guessed.root - Координаты маяков, выровненные с заданным временным шагом. Координаты нерабочих маяков аппроксимированы параллельным сдвигом относительно ранее известного положения.
4. *.evo.beacons.aligned.test.linear.root - Параметры акустической геометрии при линейной интерполяции маяков.
5. *.evo.beacons.aligned.test.linear.guessed.root - Параметры акустической геометрии при линейной интерполяции маяков с учётом аппроксимирования положений нерабочих маяков.

Результаты измерений представлены на Рис. 4.18.

4.5 Подавление шумовых импульсов.

Подавление шумов в Baikal-GVD выполняется после объединения событий, непосредственно перед выделением и восстановлением. В контексте обработки данных Baikal-GVD шумами считаются импульсы, возникшие в результате темнового тока ФЭУ или регистрации хемилюминесценции байкальской

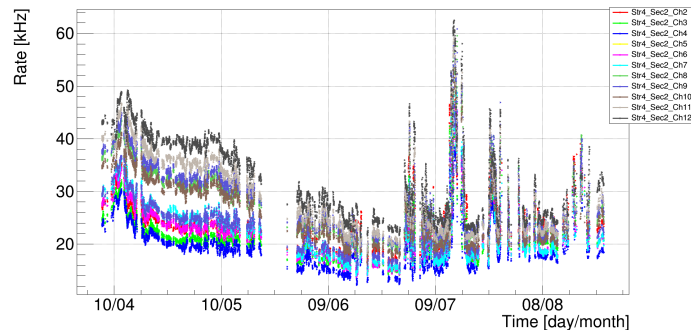


Рисунок 4.19 — Темпы счёта шумов, 2014 г.



Рисунок 4.20 — Схема работы модуля фильтрации данных Baikal-GVD

воды. События от атмосферных мюонов определяются по зенитному углу после восстановления и на этапе подготовки данных не считаются шумом.

Подавление шумовых импульсов выполняется с помощью фильтрационных модулей BARS (см. Рис. 4.20). На вход такого модуля подаётся отклик установки - набор зарядов и времён зарегистрированных импульсов события. Результатом работы модуля является *импульсная маска события* - массив флагов, помечающих импульсы отклика как шумовые или не шумовые. Импульсную маску можно также подать на вход модуля фильтрации. В этом случае, модуль будет обрабатывать только те импульсы отклика, которые не были помечены маской как шумовые. Маски можно также объединять с помощью модуля **BFilterSum**. Результатом объединения будет новая маска, флаги которой получены логическим сложением флагов исходных масок.

Такой подход позволяет создать крайне гибкую систему фильтрации импульсов события, использующую как простые сечения по параметрам импульсов (например, амплитудный порог), так и сложные алгоритмы фильтрации (например, метод причинности). Результирующая импульсная маска в дальнейшем используется для восстановления и выделения событий.

Модули фильтрации, используемые при обработке данных Baikal-GVD, можно условно разбить на четыре категории:

1. Сечения. Эти модули накладывают ограничения на значения времени, амплитуды, номера канала и заряда импульсов события.

2. Узкоспециализированные модули. Сюда относятся модули, генерирующие импульсную маску для заранее поставленных задач (например, калибровки).
3. Модули подавления шумов. Эти модули реализуют алгоритмы непосредственно предназначенные для определения шумов в массиве импульсов события.

В Baikal-GVD для подавления шумов используются все три. Одним из основных алгоритмов подавления шумов в Baikal-GVD является метод причинности, унаследованный от НТ-200. В рамках этого подхода предполагается, что разность времён Δt_{ij} любой пары импульсов в событии должна быть меньше времени распространения света между каналами, на которых были зарегистрированы эти импульсы:

$$|\Delta t_{ij}| < \frac{r_{ij}n_g}{c} + \delta \quad (4.1)$$

Здесь, r_{ij} - расстояние между каналами, а δ - постоянная величина, учитывающая влияние временного джиттера и точности временной калибровки. δ обычно принимает значения от 7 до 15 нс.

В BARS метод причинности реализован с помощью фильтрационного модуля VCausality. Алгоритм работы этого модуля представлен ниже:

1. В выходной импульсной маске события все импульсы помечаются как не шумовые.
2. Каждому i -му импульсу отклика сопоставляется счётчик нарушений k_i . Значение счётчика принимается равным нулю.
3. Для всех пар импульсов i и j установки вычисляется ΔT_{ij} .
4. Если ΔT_{ij} пары импульсов нарушает условие 4.1, то k_i и k_j увеличиваются на единицу.
5. Если нет ни одного импульса с ненулевым счётчиком, то модуль завершает работу и ожидает следующего отклика.
6. Импульс с наибольшим количеством нарушений помечается как шум и отбрасывается из дальнейшего рассмотрения.
7. Переход на этап 2.

Глава 5. Анализ мюонных данных

Мюонные события, регистрируемые телескопом, имеют 2 класса источников. Первый вид - атмосферные мюоны и нейтрино, образованные космическими лучами. Несмотря на то, что измерение параметров траекторий атмосферных мюонов не входит в физические задачи, поставленные перед Baikal-GVD, атмосферный поток служит естественным калибровочным источником света. Кроме того, в силу того, что спектр атмосферных мюонов хорошо изучен [64; 65], результаты регистрации атмосферных мюонов можно использовать для оценки методов восстановления и подавления шумов, а также качества моделирования.

Другой источник мюонного сигнала - астрофизические нейтрино, взаимодействующие с наблюдаемой средой. Источниками астрофизических нейтрино могут служить активные ядра галактик, гамма вспышки, релятивистские и медленные монополи, а также аннигиляция слабо взаимодействующих массивных частиц (WIMP) [6; 12].

Такие частицы - наиболее интересные кандидаты на роль тёмной матери, а поиск и исследования продуктов их аннигиляции и распада являются наиболее перспективным направлением в раскрытии тайн темной материи. В статье [66] рассматривается возможность регистрации потоков нейтрино, образующихся в результате аннигиляции тяжелых частиц в недрах Солнца, а в статье [67] – в Центре Галактики, многообещающих районах для поиска и раскрытия природы частиц темной материи, также как и других гипотетических частиц «новой физики».

Была выполнена оценка чувствительности Baikal-GVD к сигналу от аннигиляции темной материи в Центре Галактики [67]. Оценка сделана для одного года работы телескопа Baikal-GVD, состоящего из 12 кластеров, 2304 оптических модулей, размещенных на 96 гирляндах. Детальное описание кластера установки дано в главе 2. Местонахождение телескопа обеспечивает видимость Центра Галактики почти 75% времени в течение суток. Главной задачей было выделение потоков мюонов из нижней полусферы, путем подавления фона нисходящего потока атмосферных мюонов из верхней полусферы, который превышал восходящий поток в 10^6 раз. Задача решалась разработанными для Baikal-GVD методами обработки и фильтрации данных в процессе регистрации

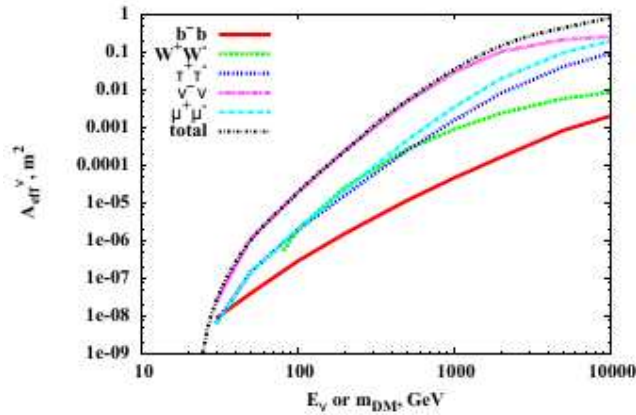


Рисунок 5.1 — Эффективная площадь кластера Baikal-GVD к нейтрино из галактического центра для разных каналов аннигиляции.

и off-line обработки данных. Модельные события были отобраны по стандартному off-line триггеру 3/6 (не менее 6 сработавших каналов на не менее, чем 3 гирляндах) во временном окне 500 нс. При анализе данных предполагалось, что точность восстановления мюонных событий составляет 4.5° . Эффективная площадь установки для нейтрино из Центра Галактики при описанных выше условиях отбора представлена на Рис. 5.1.

Рассмотрено несколько каналов аннигиляции - $\tau^+\tau^-$, $\mu^+\mu^-$, W^+W^- и $\nu\bar{\nu}$, нейтринные спектры взяты из [68]. Фон от атмосферных нейтрино был получен по результатам моделирования с условиями отбора событий, описанными выше. Среднее количество фоновых событий из нижней полусферы в течение года оценивается в 4300. Распределение фоновых событий по углу отклонения от центра галактики представлено на Рис. 5.2

Полученная таким образом оценка чувствительности 1 года работы Baikal-GVD к нейтрино от аннигиляции тёмной материи представлена на Рис. 5.3.

5.1 Экспериментальные данные

Анализ мюонных событий состоит из трех основных этапов:

- Исследования особенностей регистрации мюонов секциями оптических модулей;

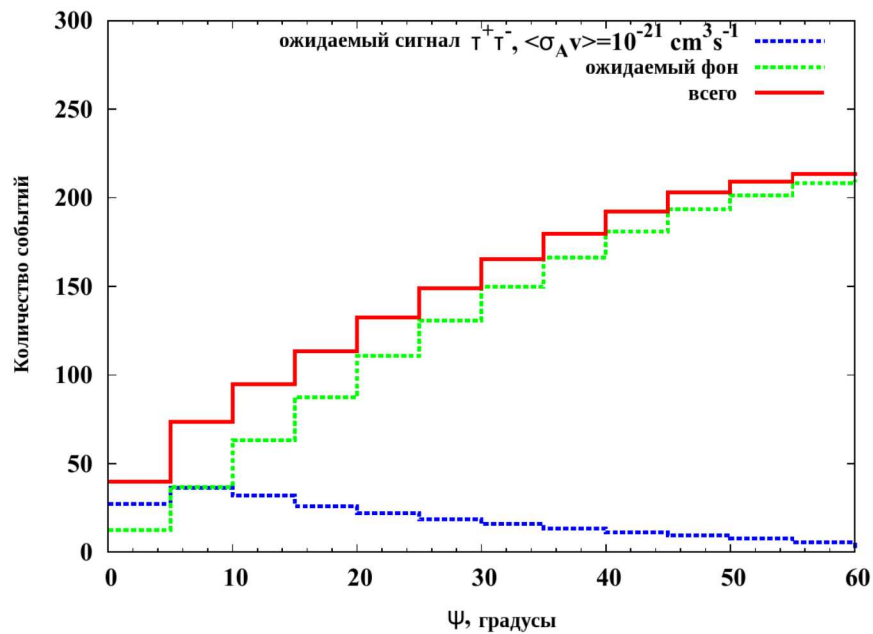


Рисунок 5.2 — Распределение событий от нейтринного и фонового сигнала в зависимости от угла отклонения от центра галактики.

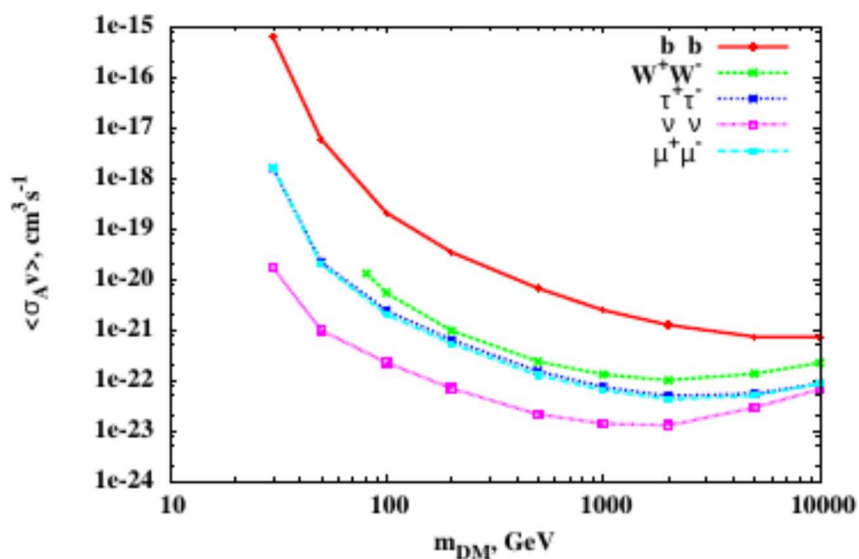


Рисунок 5.3 — Чувствительность Baikal-GVD к $\langle\sigma_{\Lambda\nu}\rangle$ в течение года для разных каналов аннигиляции

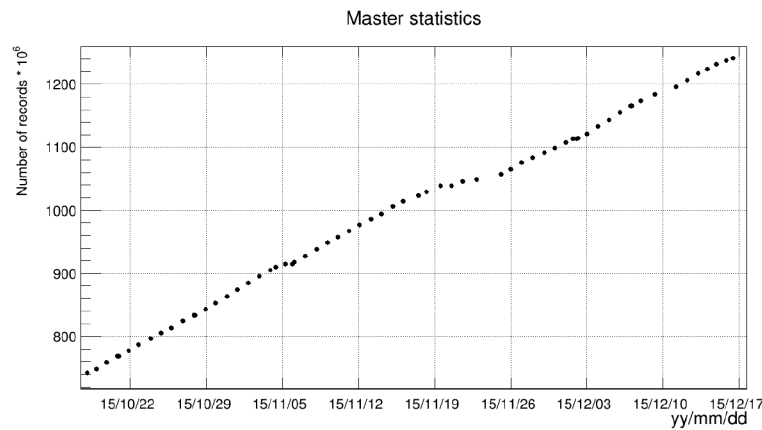


Рисунок 5.4 — Статистика набора экспериментальных данных кластером Baikal-GVD в синхронном режиме работы гирлянд при триггерных порогах 1.5/4 ф.э.

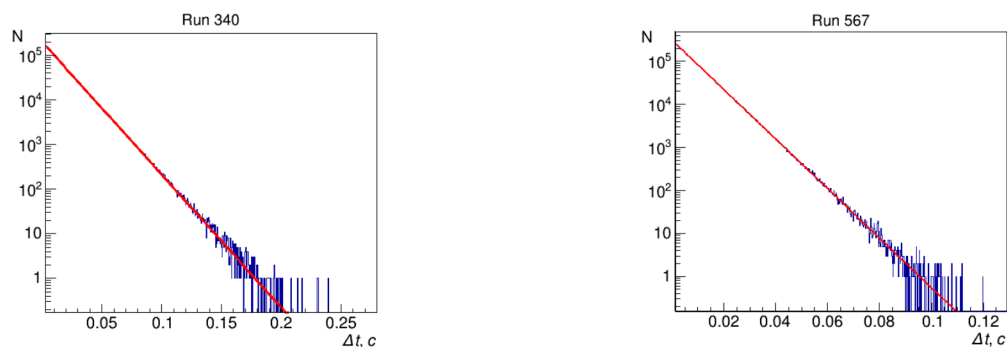
- Объединения данных от секций в физическое событие, зарегистрированное кластером;
- Отбор мюонных событий и восстановление их параметров

Для проведения этих исследований использовались данные, полученные на установке в 2013 – 2015 гг.

Экспериментальные данные, использованные для анализа мюонных событий, были получены в период с 2013 по 2015 год. В это время производилось развертывание первого кластера Baikal-GVD, поэтому конфигурация регистрирующей системы существенно менялась. В 2013 году установка состояла из 3-х гирлянд (72 ОМ), в 2014 – из 5 гирлянд (120 ОМ), в 2015 – из восьми гирлянд (192 ОМ).

Наиболее статистически значимый экспериментальный материал был получен в 2015 году. В общей сложности было проведено 583 серии измерений (в том числе 153 в калибровочных и тестовых режимах работы) и зарегистрировано более чем 109 событий по триггерам, ориентированным на регистрацию физических событий (мюонов и каскадных ливней). На Рис. 5.4 представлена статистика набора экспериментальных данных (количество триггерных событий, набранных с начала работы установки) в период относительно стабильного светового фона оз. Байкал (с октября по декабрь 2015 года).

В режиме экспозиции набор данных осуществлялся в синхронном режиме работы (общий триггер транслировался на все секции кластера). Запросы секций вырабатывались при условии совпадения соседних каналов. Триггерные пороги каналов выбирались в диапазоне от 0.5/3 ф.э. до 1.5/4 ф.э. (основной



а) Сеанс 340 (2015 год)

б) Сеанс 567 (2015 год)

Рисунок 5.5 — Примеры распределений временных интервалов между событиями. Сплошная линия - результат фитирования данных экспоненциальной зависимостью.

режим работы) таким образом, чтобы средняя частота регистрации событий не превышала 250 Гц. В этом случае кратковременное возрастание темпа счета триггерных сигналов из-за изменения интенсивности свечения воды оз. Байкал не выводит систему сбора данных установки из стабильного режима работы. Общий триггер формировался по любому сигналу запрос секции, поступающему в центр сбора данных кластера. В качестве основных критериев качества регистрации событий использовались распределения временных интервалов между событиями и количество событий, зарегистрированных за фиксированный интервал времени.

Примеры распределений временных интервалов между событиями показаны на Рис. 5.5 для двух серий измерений: сеанса №340 (с 8.09.2015 16:20 по 9.09.2015 17:33, темп набора ~ 70 Гц) и сеанса №567 (с 2.11.2015 22:46 по 3.11.2015 21:43, темп набора ~ 150 Гц). Экспоненциальный вид распределений указывает на отсутствие коррелированных во времени сигналов, сформированных триггерной системой, и согласуется с предположением о пуассоновском характере потока регистрируемых событий.

На Рис. 5.6 представлен пример распределения по количеству событий, зарегистрированных за фиксированные интервалы времени в сеансе №340. Интервал времени для каждой серии измерений выбирается таким образом, чтобы в среднем в этом интервале регистрировалось около 20 событий (0.31 секунды для выбранной серии измерений). Полученное распределение хорошо согласуется с распределением Пуассона (сплошная линия).

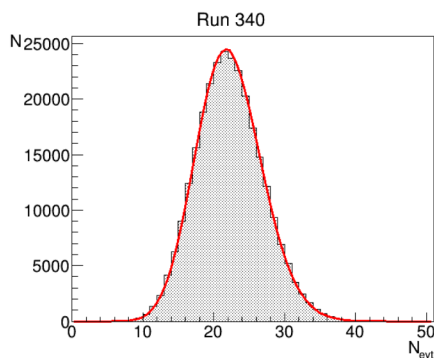


Рисунок 5.6 — Распределение количества событий, зарегистрированных в фиксированные интервалы времени (0.31 с) в течение сеанса 340. Сплошная линия - фитирование пуассоновским распределением, $\lambda = 10$.

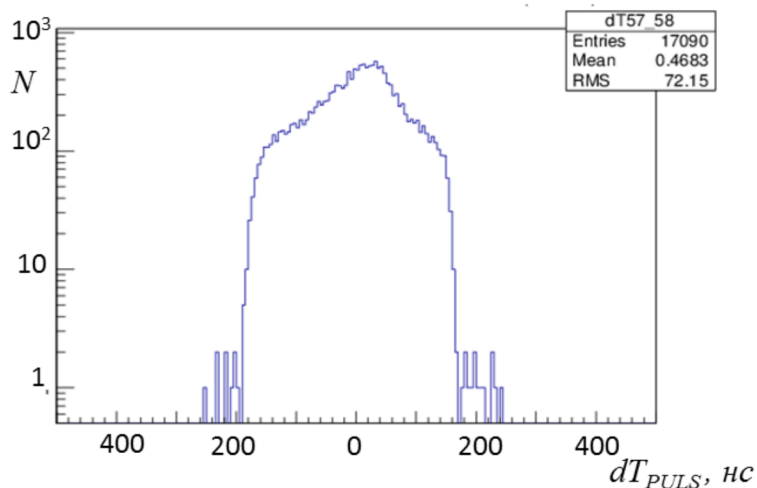


Рисунок 5.7 — Временные распределения между сигналами на соседних каналах секций: разрешающее время схемы совпадений 200 нс.

Во время работы установки осуществлялся периодический контроль параметров триггерной системы: порогов регистрации, временного окна совпадений, временных распределений потоков поступающих событий. На Рис. 5.7 показан пример распределения временного распределения между сигналами, зарегистрированными на соседних каналах секций, для разрешающего времени схемы совпадений 200 нс (контроль временного окна для совпадений).

На первом этапе анализа полученная экспериментальная информация была использована для исследования особенностей регистрации мюонов секциями оптических модулей.

5.2 Регистрация мюонов секцией Baikal-GVD

Как было описано в Главе 2, секция – основной элемент системы сбора данных. Набор записей от секций (мастерных записей) образует отклик детектора на зарегистрированное физическое событие (в контексте этой работы - на регистрацию мюона). Формирование отклика установки (см. пункт 5.4) на мюонное событие из нескольких секционных записей - необходимое условие восстановления направления мюона, так как определение параметров траектории по данным одной секции невозможно в силу осевой симметрии секции. Тем не менее, секционные записи, взятые независимо друг от друга, не бесполезны. Результаты регистрации секциями околорвертикальных атмосферных мюонов могут быть использованы для исследования методов выделения сигналов от мюонов (подавления шумов), анализа корректности функционирования измерительных каналов установки, проверки качества моделирования отклика детектора и для определения межканальных временных сдвижек.

5.2.1 Анализ работы каналов секции по атмосферным мюонам

Подавление событий от нисходящего потока атмосферных мюонов представляет собой одну из основных задач обработки восстановленных мюонных траекторий Baikal-GVD. Тем не менее, сигнал от атмосферного фона играет важную роль в обработке данных установки. Во-первых, восстановление траекторий атмосферных мюонов позволяет оценить точность и эффективность работы алгоритмов восстановления и подавления шумов на большой статистике. Во-вторых, атмосферные мюоны представляют собой природный калибровочный источник установки, аналогичный лазерным источникам и светодиодным матрицам. Использование атмосферного сигнала для калибровки нейтринных телескопов - распространённая практика, применявшаяся, в частности, в IceCube [29].

В Baikal-GVD результаты регистрации атмосферных мюонов секциями установки используются для вычисления межканальных задержек по расхождениям времён прохода мюонов между соседними каналами установ-

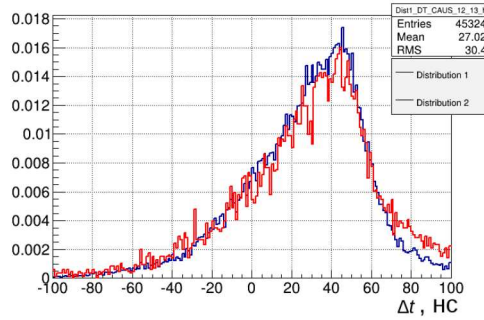


Рисунок 5.8 — Примеры экспериментального (красн.) и модельного (синее) ΔT распределений

ки. Распределения межканальных задержек в дальнейшем будут называться ΔT -распределениями.

Пусть $\Delta T_{i,j}^A$ и $\Delta T_{i,j}^B$ - распределения задержек между каналами i и j , полученные из разных наборов данных. Пусть, далее, $\Delta t_{i,j}^{A,B}$ - расстояние между этими распределениями. Предполагая, что $\Delta T_{i,j}^A$ и $\Delta T_{i,j}^B$ имеют одинаковую форму, $\Delta t_{i,j}^{A,B}$ будет равно расстоянию, на которое надо сдвинуть одно распределение, чтобы оно полностью “наложилось” на другое. Формальное определение расстояния между распределениями будет дано ниже. Тогда:

- Если $\Delta T_{i,j}^A$ получено из экспериментальных данных, а $\Delta T_{i,j}^B$ - из моделирования, то $\Delta t_{i,j}^{A,B}$ будет разностью временных сдвижек каналов i и j . На основе значений Δt для всех пар каналов секции можно вычислить значения временных сдвижек каналов, что эквивалентно временной калибровке секции. Такой метод также позволяет проверить результаты временной калибровки искусственными источниками.
- Если $\Delta T_{i,j}^A$ получено из экспериментальных данных, а $\Delta T_{i,j}^B$ - из моделирования, то сравнение этих распределений позволяет оценить качество моделирования.
- Если $\Delta T_{i,j}^A$ и $\Delta T_{i,j}^B$ получены из разных наборов экспериментальных данных, то значение $\Delta t_{i,j}^{A,B}$ позволяет оценить стабильность временной калибровки, а сравнение формы распределений - стабильность работы каналов.

Совокупность перечисленных задач называется мюонной калибровкой.

Описание метода

Пусть даны два ΔT -распределения: “фиксированное” $F(\Delta t)$ и “скользящее” $V(\Delta t)$, Δt - значение задержки. Пусть, далее, M - некоторая метрика на пространстве ΔT -распределений. Тогда межканальную задержку можно определить следующим образом:

$$\Delta T_\mu = \mathit{arg} \min_{\tau} M(F, V(\tau)) \quad (5.1)$$

Здесь $V(\tau) = V(\Delta t + \tau)$ - “смещённое” на τ распределение V .

Таким образом, вычисление межканальной задержки сводится к оптимизации статистической метрики M по смещению скользящего распределения. Стоит отметить, что, как будет показано ниже, брать в качестве оптимизационной функции именно метрику необязательно.

Отбор исключительно мюонных событий для ΔT -распределений возможен только после их успешного восстановления. Чтобы избежать такой зависимости, мюонные межканальные задержки определяются следующим образом:

1. Шумовые импульсы события отбрасываются по методу причинности.
2. Для каждого сработавшего канала отбираются первые импульсы с зарядом, превышающим порог в 2 фотоэлектрона, остальные импульсы отбрасываются.
3. Разности между временами оставшихся импульсов на соответствующих каналах принимаются за мюонные задержки.

Благодаря высокому порогу фильтрации по зарядам и фильтрации шумов, полученные ΔT -распределения дают качественное приближение реальных распределений.

Используемые целевые функции

Для вычисления 5.1 были опробованы три различные целевые функции M . Предполагается, что ΔT -распределения дискретны.

– Расстояние χ^2

$$M_{\chi^2}(V(\tau), F) = -\frac{1}{\sum F \sum V} \sum_i \left(\frac{(F_i \sum V - V_i \sum F)^2}{F_i + V_i} \right) \quad (5.2)$$

– Расстояние Колмогорова-Смирнова

$$M_{KS}(V(\tau), F) = \max_i |V_i(\tau) - F_i| \quad (5.3)$$

– Интеграл пересечения распределений

$$M_{min}(V(\tau), F) = -\sum_i \min(V_i(\tau), F_i) \quad (5.4)$$

Эта целевая функция не является, строго говоря, метрикой, так как она не удовлетворяет неравенству треугольника.

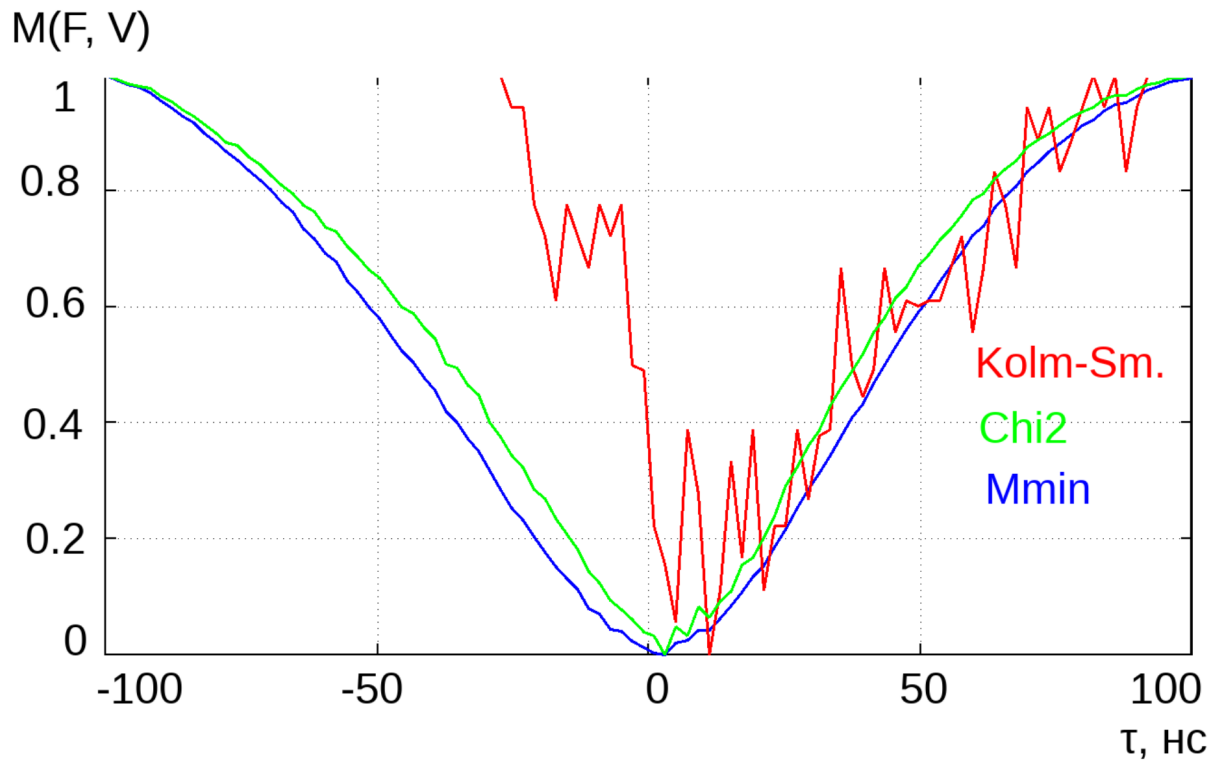


Рисунок 5.9 — Зависимость целевых функций от τ для данных кластера 2013 г.

На Рис. 5.9 представлена зависимость значения целевых функций от сдвига скользящего распределения τ для каналов 60/61 кластера 2013 года и бинами (столбцами) шириной в 1 нан. Эта иллюстрация отражает типичное поведение рассматриваемых целевых функций.

- Статистика Колмогорова-Смирнова обладает большим количеством локальных минимумов и асимметрична (так как сами ΔT -распределения обладают ярко выраженной асимметрией, см. Рис. 5.8).
- M_{min} и M_{χ^2} ведут себя сходным образом, но M_{min} обладает более выделенным минимумом, обусловленным крутым задним фронтом ΔT -распределений. Обе функции также унимодальны и не обладают константными участками, что облегчает минимизацию. Стоит отметить, что вычисление M_{chi^2} занимает больше времени, чем вычисление M_{min} .

Вычисление ошибок

Алгоритм вычисления межканальных сдвижек по ΔT распределениям, описанный в 3.1, опирается на функционал M , определяющий расстояние между двумя одномерными распределениями. В качестве M можно использовать существующие статистические механизмы (например, метрики χ^2 и Колмогорова-Смирнова). Были опробованы различные варианты M и было решено остановиться на самом простом, но эффективном случае:

$$M_{min} = \sum_1^k \min\left(\frac{n_i}{N}, \frac{m_i}{M}\right) \quad (5.5)$$

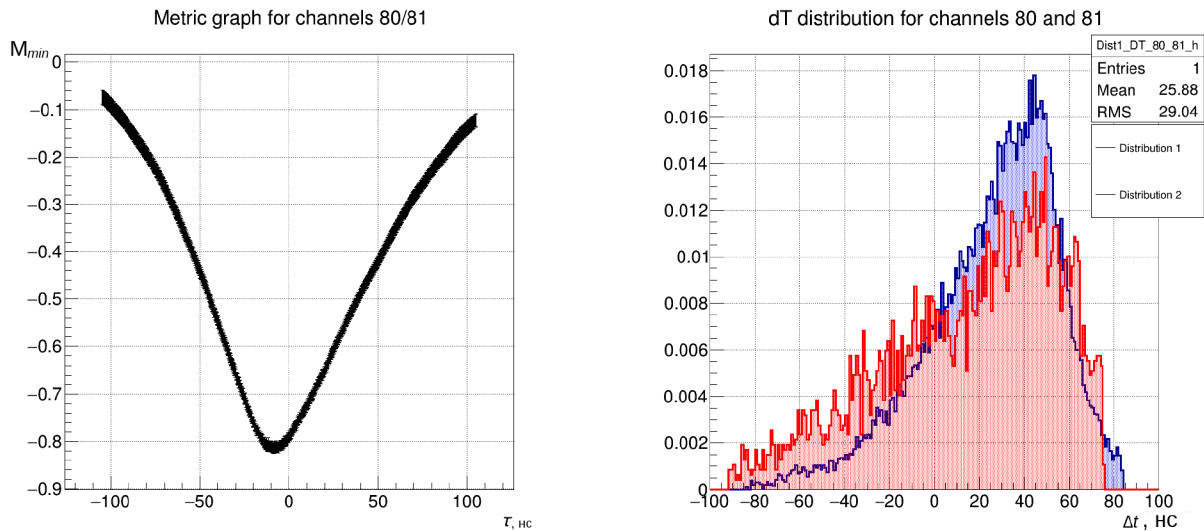
Здесь:

1. n_i, m_i - число входов в i -й бин гистограмм экспериментальной и модельной выборок.
2. N и M - объёмы выборок.
3. k - число бинов.

Предполагая, что бины экспериментальной и модельной выборок распределены по Пуассону, несложно определить погрешность M . На Рис. 5.10 показано поведение M в зависимости от $\tau_{i,j}$ для каналов 80 и 81 конфигурации 2014 года.

Погрешность $\Delta\tau$ получается следующим образом:

1. Для M_{min} в окрестности минимума берётся параболический фит.
2. Погрешность ΔM_{min} задаёт проекцию полученного фита на ось τ .
3. Половина такой проекции принимается за $\Delta\tau$.

Рисунок 5.10 — Пример M_{min}

В дальнейшем под $\Delta\tau$ подразумевается значение, полученное именно таким образом.

Стоит отметить также, что M_{min} обладает несколькими интересными свойствами. Во-первых, погрешность M_{min} линейно зависит от погрешностей бинов и падает с увеличением статистики как $O(n^{-1})$. Во-вторых, значение $1 - M_{min}(EXP(\tau), MC)$ показывает, какой процент статистики расходится, т.е. какой процент статистики мешает распределениям полностью сойтись. Таким образом, $1 - M_{min}(EXP(\tau), MC)$ можно интерпретировать как оценку качества моделирования или степень подобия экспериментальных данных.

5.2.2 Результаты

С помощью разработанной процедуры мюонной калибровки была проведена оценка стабильности временных сдвижек каналов кластера за 2014 год. Для этого были использованы данные моделирования конфигурации 2014 г. В качестве опорных экспериментальных данных были взяты мюонные сеансы работы установки с 1 по 7 июня 2014 года. Суммарная статистика составила приблизительно 19 миллионов событий.

Экспериментальные данные были откалиброваны по времени, заряду и амплитуде. Анализ был проведён по 70 сеансам, с 1 июня по середину ноября

2014 года. На Рис. 5.11 а) и б) представлены межканальные сдвиги, полученные в результате мюонной калибровки опорного сеанса и сеансов июня по ноябрь 2014 года. На Рис. 5.11 с) и d) представлены межканальные сдвиги, полученные в результате мюонной калибровки модельных данных и сеансов с июня по ноябрь 2014 года.

По Рис. 5.11 видно, что за редкими исключениями межканальные сдвиги остаются в пределах погрешности. Это означает, что

1. Временная калибровка может быть использована, как минимум, через полгода после того, как она была проведена.
2. Моделирование адекватно описывает эксперимент на протяжении как минимум полугода.

Как уже упоминалось, оптимальное значение M_{min} можно интерпретировать как процент согласованности двух наборов данных, предоставленных мюонной калибровке. Распределение оптимальных значений M_{min} для двух пар каналов, для которых проводилась мюонная калибровка по сеансам 2014 года относительно модели и эксперимента представлены на Рис. 5.12.

На Рис. 5.12 видно, что согласованность модельных данных с мюонными сеансами составляет 76% ($\sigma = 5\%$). Для опорных экспериментальных данных согласованность с мюонными данными за полгода составляет 84% ($\sigma = 4\%$). Такое поведение M_{min} говорит о том, что установка в целом ведёт себя стабильно. Расхождения в форме распределений согласованности для модели и опорных экспериментальных данных объясняются, скорее всего, неточностями чувствительности ФЭУ в модели.

На Рис. 5.13-5.14 представлены модельное и экспериментальное ΔT -распределения 34/35 каналов до и после калибровки экспериментального распределения полученными мюонными задержками. На Рис 5.15-5.16 представлены те же распределения в интегральной форме.

Полученные значения согласуются с полученными независимо светодиодными задержками с $\rho = 0.86$. На Рис. 5.17 представлена зависимость задержки от номера канала для светодиодных и мюонных калибровок.

После установки кластера 2015 года одной из задач анализа экспериментальных данных было определение смещения канальных задержек по сравнению с 2014 годом. Для этих целей была проведена мюонная калибровка для опорных данных 2014 года (1-7 июня 2014) и сеанса E0199 2015 года. Оба на-

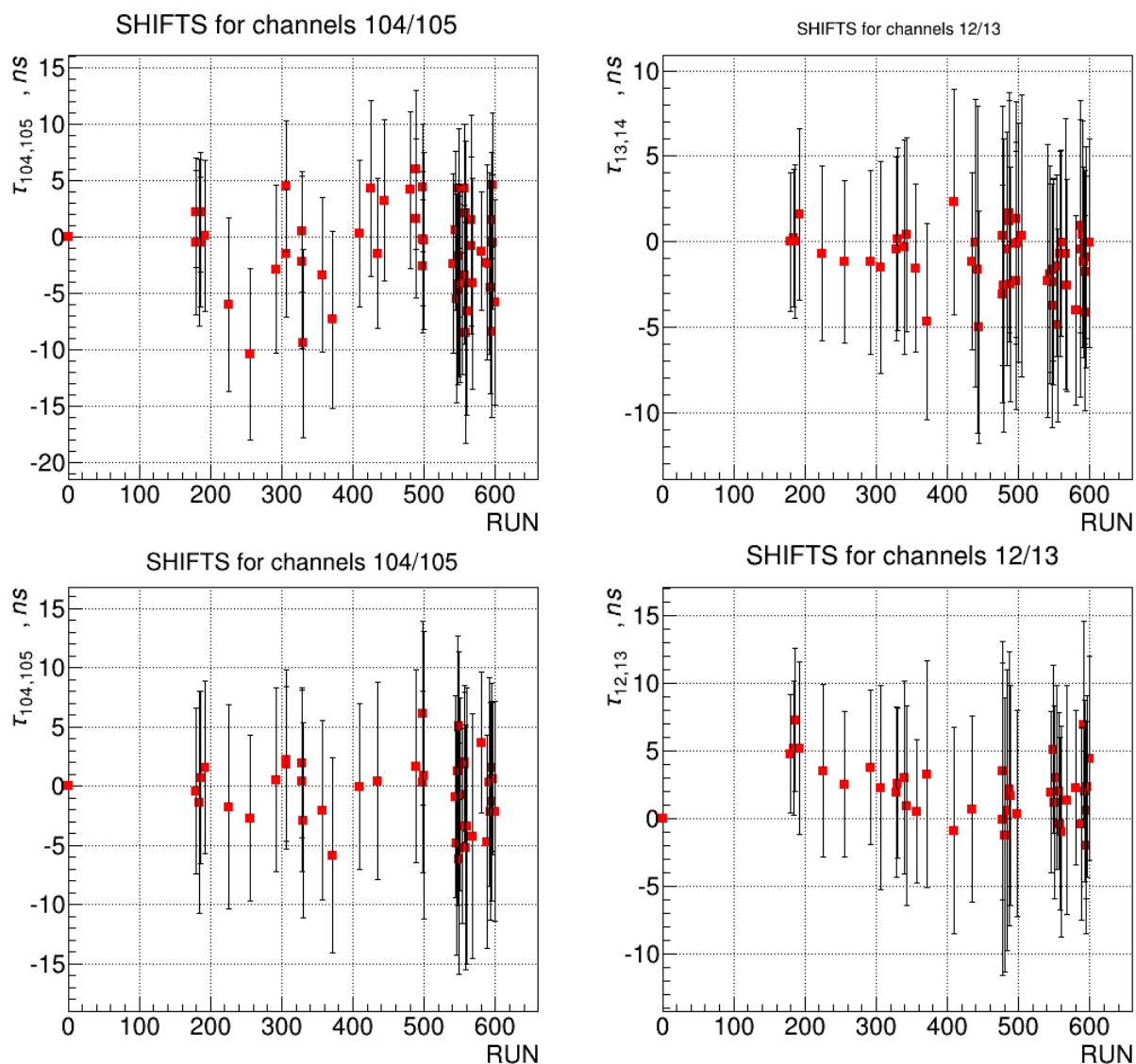


Рисунок 5.11 — Зависимость межканальных сдвижек от номера сеанса, 2014 г.

бора данных были откалиброваны по времени. На рисунке 5.18 представлены полученные значения временных сдвижек для гирлянды №3.

Из рисунка 5.18 можно сделать следующие выводы:

1. Подавляющее большинство сдвижек лежит в пределах погрешности нуля.
2. Практически все полученные сдвижки лежат в интервале от 0 до -5 нс.
3. Средняя погрешность составляет порядка 5 нс (что характерно для мюонной калибровки в целом)
4. Сдвижки для пар каналов 52/53 и 65/66 гарантированно меньше нуля.

Во время экспедиции 2015 года гирлянда №3 не поднималась и никаких работ на ней не проводилось. Это означает, что представленные сдвижки являются характерными изменениями межканальных задержек за год.

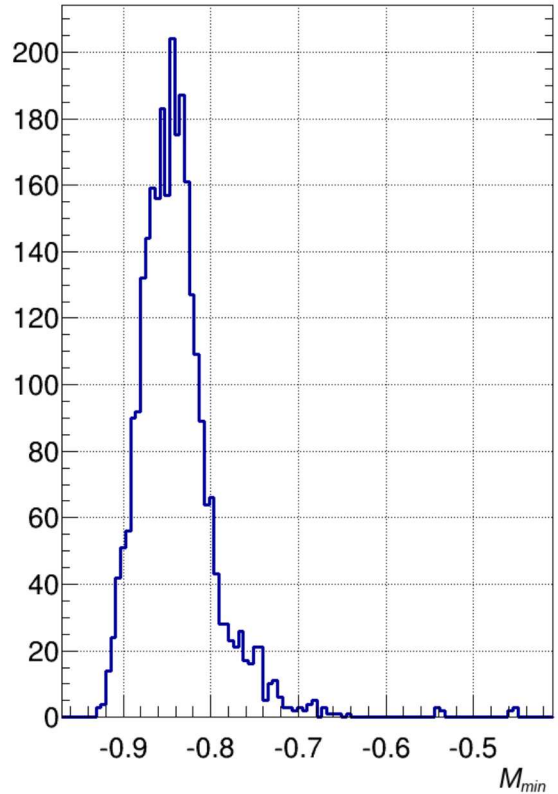
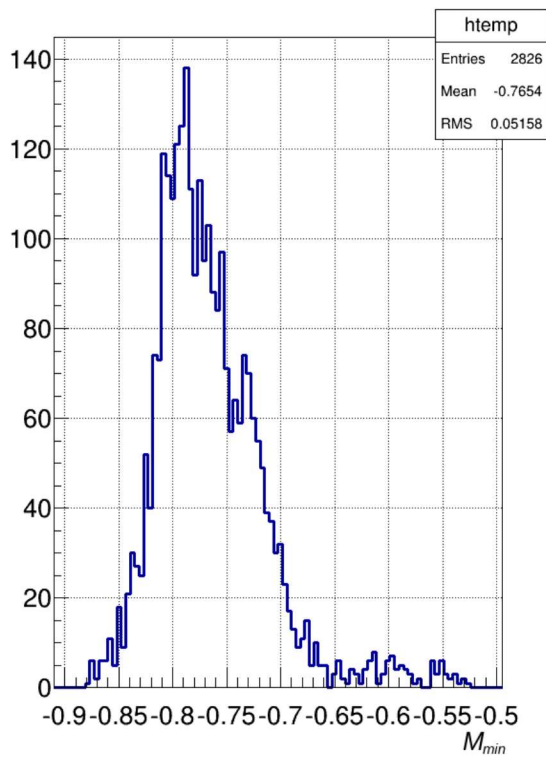


Рисунок 5.12 — Примеры распределений значений $M_{min}(\tau)$ для двух пар каналов по данным 2014 года, $\tau \in [-300; 300]$. Значение $M_{min}(\tau)$ равно интегралу пересечения нормированных ΔT распределений модели и эксперимента при сдвиге экспериментального распределения на τ нс.

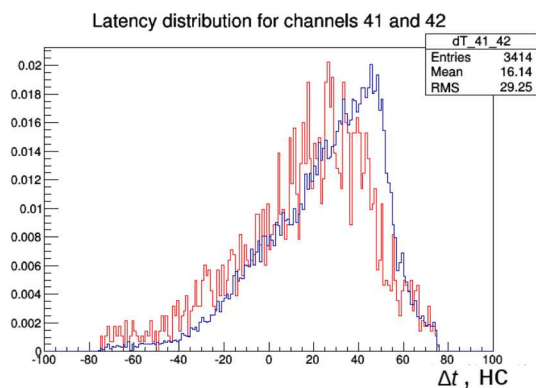


Рисунок 5.13 — Модельное (синее) и экспериментальное (красн.) ΔT -распределения

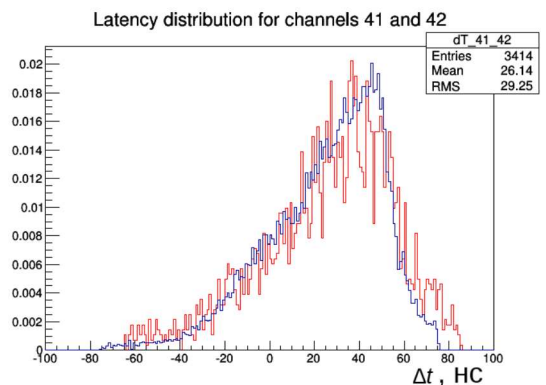


Рисунок 5.14 — Модельное (синее) и калиброванное экспериментальное (красн.) ΔT -распределения

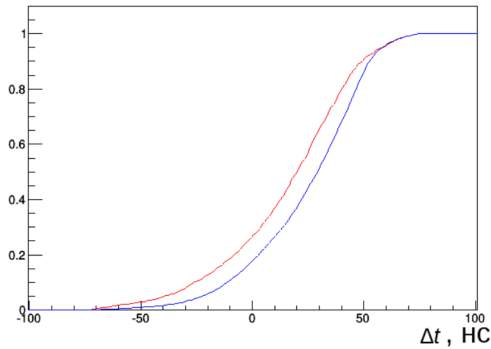


Рисунок 5.15 — Модельное (синее) и экспериментальное (красн.) ΔT -распределения в интегральной форме

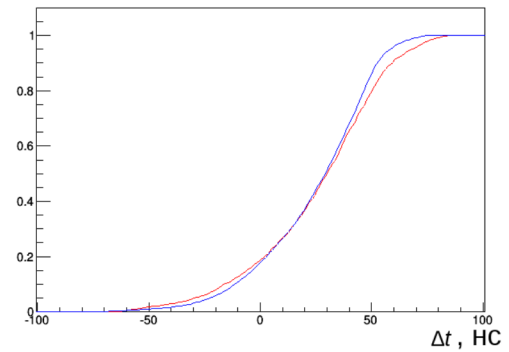


Рисунок 5.16 — Модельное (синее) и калиброванное экспериментальное (красн.) ΔT -распределения в интегральной форме

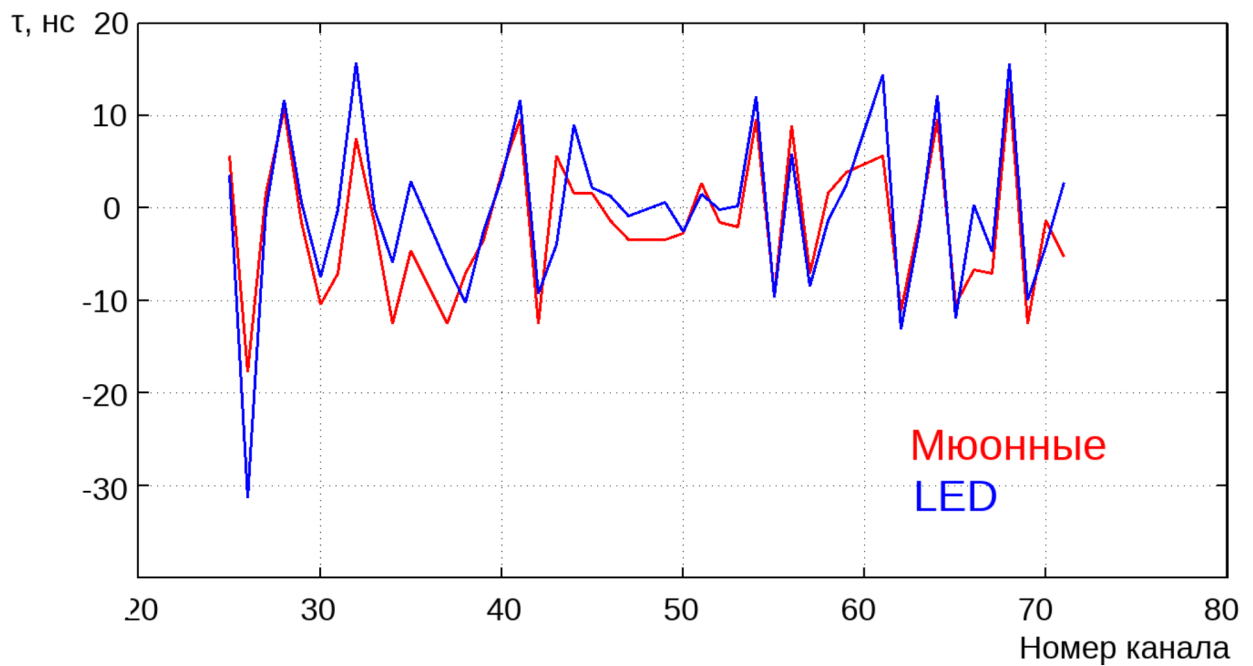


Рисунок 5.17 — Зависимость задержки от номера канала. Красный - мюонные задержки, синий - светодиодные.

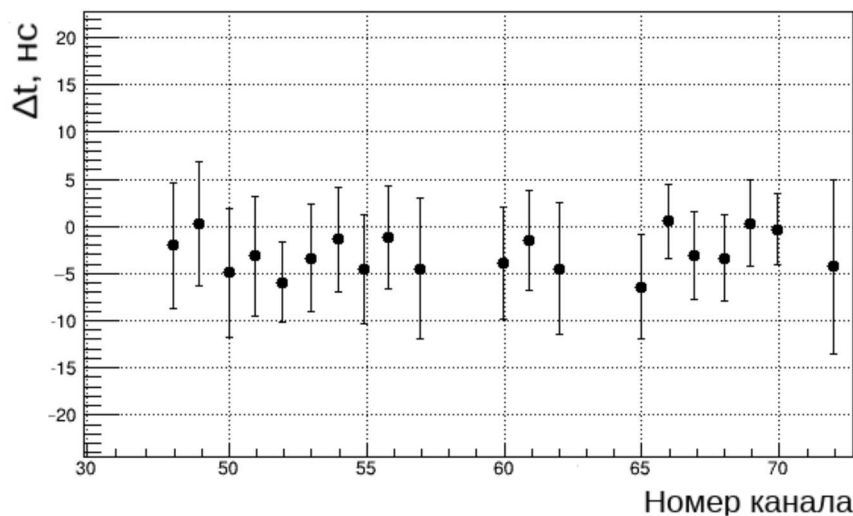


Рисунок 5.18 — Мюонные сдвиги 2014/2015 (гирлянда №3)

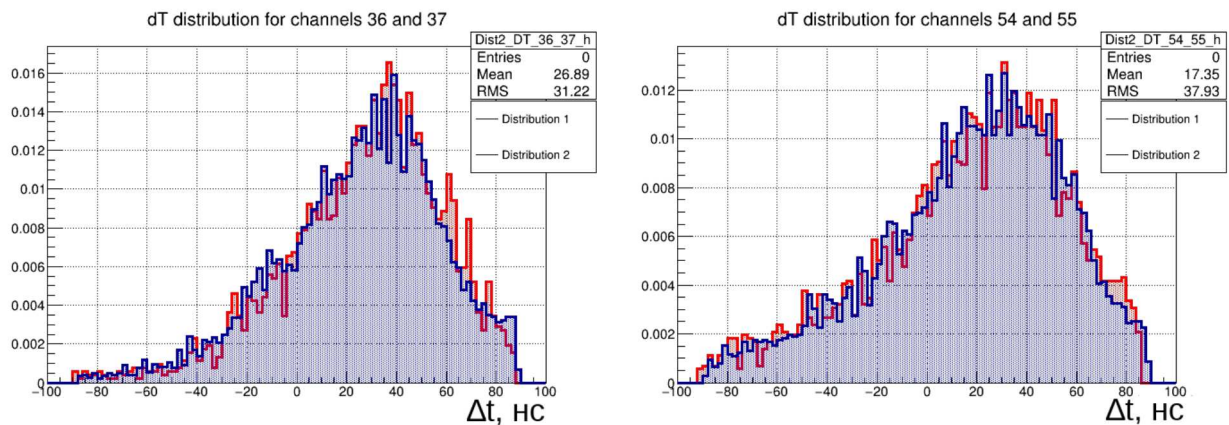


Рисунок 5.19 — Примеры ΔT распределений для данных 2014/2015 года

При ближайшем рассмотрении ΔT распределения 2014 и 2015 года очень близки друг к другу (рисунок 5.19).

5.3 Формирование событий

Методика формирования событий определяется особенностями функционирования системы сбора данных установки. Источниками данных являются модули 12-канальных АЦП (центральные модули секций), которые преобразуют импульсы с оптических модулей в цифровой вид и формируют *записи АЦП*, содержащие временные кадры каналов. Условием формирования записи АЦП

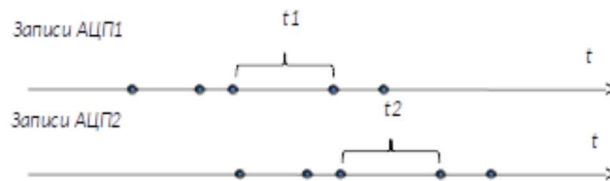


Рисунок 5.20 — Методика проверки корректности формирования событий по параметру

является регистрация триггерного сигнала, который останавливает процесс преобразования входных сигналов и инициирует процесс формирования кадров и передачи информации. Помимо временных кадров, каждая запись АЦП содержит идентификатор АЦП (IP-адрес) время регистрации триггерного сигнала (время измеряется по локальным часам АЦП) и номер триггера, который суммируется во встроенном в плату АЦП счетчике. Для формирования общего события, содержащего информацию со всех каналов установки, необходимо идентифицировать записи АЦП, которые относятся к данному событию. Поскольку установка работает в синхронном режиме (по общему триггеру, поступающему на все модули АЦП), то очевидным параметром, обеспечивающим идентификацию записей, является номер триггера. Технически, формирования событий по номеру триггера представляет собой тривиальную задачу. Однако возможные сбои в работе счетчиков и скачки значений счётчиков, связанные с бросками напряжения электропитания, могут исказить последовательность номеров записей, что может привести к частичной потере или искажению физических данных. Поэтому при формировании событий используется дополнительный параметр – время регистрации триггера.

Алгоритм формирования событий включает в себя следующие процедуры:

- Объединение записей по номерам триггера;
- Проверка корректности объединения на основании времени регистрации триггера.
- Корректировка номеров триггера в случае обнаружения ошибок формирования событий.

Поскольку часы модулей АЦП не синхронизованы, для проверки корректности формирования событий используется не абсолютные времена регистрации триггера, а разность временных интервалов между записями $\Delta t = t_1 \checkmark t_2$ (см. Рис. 5.20).

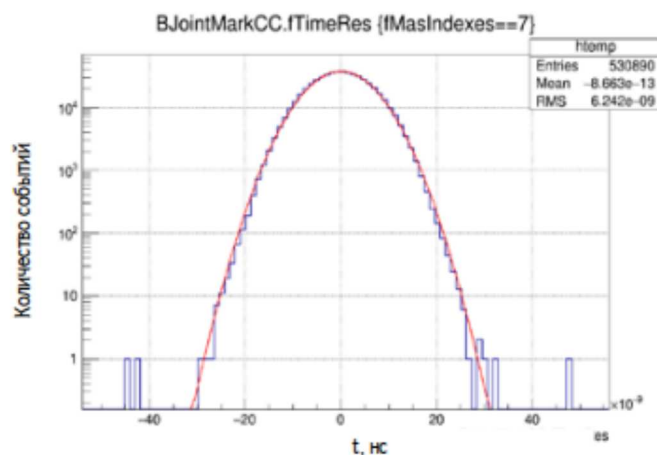


Рисунок 5.21 — Распределение событий по параметру Δt

Величина Δt определяется частотой таймеров АЦП (100 МГц) и временным разбросом времени регистрации триггера, связанным с наложением на передний фронт сигнала наводок, возникающих в километровой кабеле. Для корректно сформированных событий величина Δt не должна превышать трех - четырех отсчетов часов АЦП (один отсчет равен 10 нс). В том случае, если объединяются записи из разных событий (не корректное формирование событий), величина Δt определяется частотой поступления триггерных сигналов f_{trig} . Для штатного режима работы $f_{trig} \sim 100$ Гц, а $\Delta t \sim 10$ мс.

Корректность объединения событий в серии измерений определяется по величине среднеквадратичного отклонения $\sigma(\Delta t)$, которое должно составлять величину около 6 нс. На Рис. 5.21 представлен пример распределения значений Δt , полученного во время одной из серий измерений для двух АЦП установки.

В таблице 3 представлены среднеквадратичные отклонения распределений разности временных интервалов между записями АЦП ($\sigma(\Delta t)$), полученные по одной серии измерений. Значение Δt вычислялось относительно АЦП центра кластера (№190).

5.4 Методика восстановления параметров мюонных траекторий

Результатом регистрации мюонного события Baikal-GVD является массив импульсов сработавших каналов установки. Этот массив содержит информацию об амплитудах и временах импульсов, а также координаты каналов в момент ре-

Таблица 3 — Среднеквадратичные отклонения распределений разности временных интервалов между записями АЦП (относительно записей АЦП центра кластера)

№АЦП	220	208	195	211	219	197	212	207	217	204
$\sigma(t)$, нс	5.4	5.8	6.0	5.7	5.7	5.7	5.6	6.0	5.8	5.6
№АЦП	209	202	216	192	210	214	222	215	213	221
$\sigma(t)$, нс	6.0	5.6	5.8	5.6	6.3	5.7	5.7	5.8	5.6	5.8

гистрации. Определение направления мюона по этим данным называется задачей восстановления мюонной траектории. В Baikal-GVD используется механизм восстановления, аналогичный тому, который использовался в НТ-200.

В нейтринных телескопах задача восстановления мюонных траекторий обычно решается путём определения и оптимизации функции правдоподобия отклика установки по параметрам траектории:

$$\mathcal{L} = \prod_{i=1}^{N_{channels}} P_i(a_i, t_i, \mathbf{r}_i | \boldsymbol{\mu}) \quad (5.6)$$

Здесь P_i - вероятность срабатывания i -го канала, a_i , t_i , \mathbf{r}_i - амплитуда, время и координаты канала соответственно, а $\boldsymbol{\mu}$ - параметризация мюонной траектории.

Физически точное определение функции правдоподобия - крайне сложная задача. Для того, чтобы её упростить, делается два допущения: при восстановлении не используется информация о амплитудах импульсов, а распределения ошибок параметров отклика предполагаются гауссовыми. В силу последнего допущения, максимизацию функции правдоподобия можно в приближении заменить на минимизацию χ^2 [43; 69; 70]:

$$\chi_t^2(\hat{\boldsymbol{\mu}}) = \sum_{i=1}^{N_{hit}} \left(\frac{T_i(\hat{\boldsymbol{\mu}}) - t_i}{\sigma_{t_i}} \right)^2 \quad (5.7)$$

Здесь, T_i - ожидаемое время регистрации импульса на i -м канале, σ_{t_i} - ошибка измерения времени, $\hat{\boldsymbol{\mu}}$ - параметры гипотезы мюонной траектории. Информация о вероятностях срабатываний каналов с полученными амплитудами используется после оптимизации χ^2 как один из методов оценки качества восстановления.

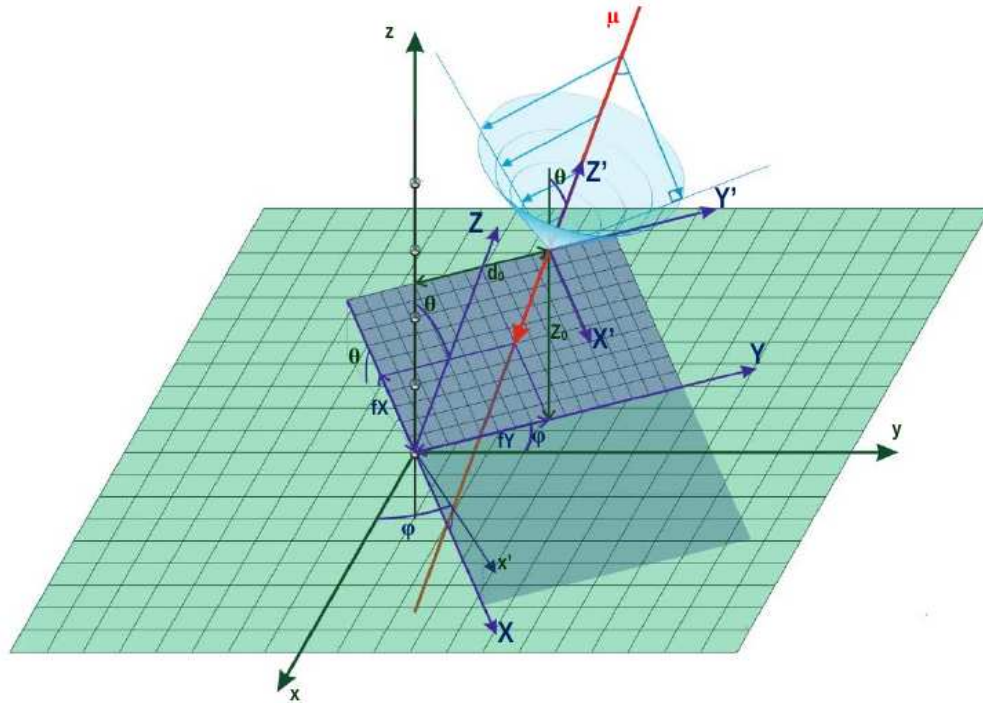


Рисунок 5.22 — Параметризация мюонной траектории [43]

Время регистрации сигнала измерительным каналом определяется следующим выражением [43]:

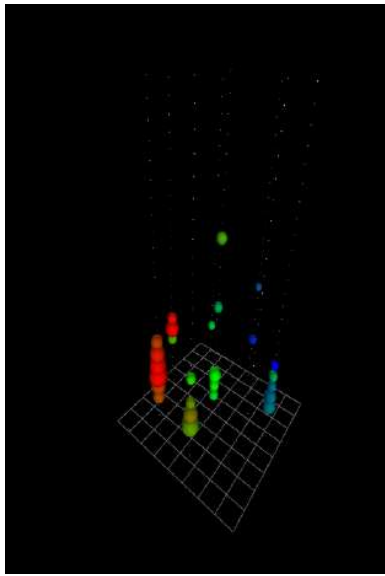
$$T_i = t_0 - \xi_i/c + \rho_i/c \left(\frac{n_g}{\sin\theta_{ch}} - \frac{1}{n\sin\theta_{ch}} \right) \quad (5.8)$$

Здесь: n и n_g - показатели преломления воды с учётом и без учёта групповой скорости, ρ_i - расстояние от мюонной траектории до i -го канала, ξ_i - расстояние от траектории до плоскости $X'Y'$, перпендикулярной траектории мюона и проходящей через геометрический центр установки (см. Рис 5.22).

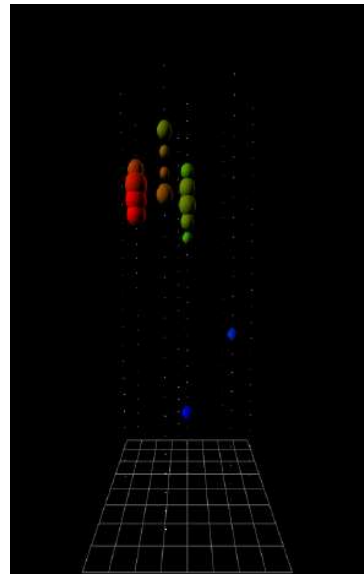
Мюонная траектория параметризуется вектором $(\theta, \phi, u_0, v_0, t_0)$, где θ и ϕ - зенитный и азимутальный углы траектории, u_0 и v_0 - координаты пересечения траектории и плоскости $X'Y'$, а t_0 - время прохождения мюона через $X'Y'$. Эта параметризация изображена на Рис. 5.22.

Ошибка измерения времени σ_{t_i} зависит от амплитуды, однако в настоящий момент её значение приближенно принимается равным 5 нс.

По данным 2015 года, были обработаны $\sim 1.2 \times 10^8$ событий. После подавления шумов методом причинности и фильтрацией по количеству сработавших каналов осталось $\sim 5 \times 10^6$ событий. С помощью указанного метода было осуществлено восстановление некоторых из них. Примеры восстановления приведены на Рис. 5.23.



а) Событие №62778, восстановленный
зенитный угол - 33° .



а) Событие №76419, восстановленный
зенитный угол - 69° .

Рисунок 5.23 — Примеры восстановленных мюонных событий (2015 г.)

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Разработана архитектура системы обработки и анализа данных Байкальского эксперимента: программной платформы BARS. Система обработки данных обеспечивает единую модульную платформу для анализа данных и стандартизацию форматов представления экспериментальной, модельной и калибровочной информации.
2. Разработана, опробована и реализована методика мюонной калибровки каналов. Мюонная калибровка позволяет определять временные сдвиги каналов и мониторировать стабильность их работы. Разработанная методика также может применяться для контроля качества моделирования отклика установки на мюонные события.
3. На основе платформы BARS разработано и реализовано программное обеспечение для обработки данных системы позиционирования Baikal-GVD (акустической системы измерения координат оптических модулей). Разработанная подсистема позволяет учитывать динамику геометрии установки при обработке событий.
4. Была найдена оптимальная конфигурация триггера установки, обеспечивающая максимальную эффективную площадь регистрации мюонных событий в условиях ограничения на пропускную способность каналов передачи данных кластера.
5. Была проведена калибровка каналов кластера Baikal-GVD в конфигурациях 2013, 2014 и 2015 годов.
6. Проведённые работы по обработке экспериментальных данных позволили подготовить банк данных Baikal-GVD для проведения физического анализа мюонных событий.
7. Работа, выполненная при подготовке ледового лагеря и монтаже установки во время трех экспедиций на оз. Байкал, явилась существенным вкладом в создание первого кластера глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD.

В заключение я выражаю благодарность и большую признательность научному руководителю В. М. Айнутдинову за поддержку, помощь, терпение, обсуждение результатов и научное руководство. Я благодарю А. В. Аврорина за

безграничную поддержку и помощь на всех этапах работы. Отдельная благодарность - заведующему лабораторией нейтринной астрофизики высоких энергий Г. В. Домогацкому, без которого создание Baikal-GVD было бы невозможным. Большое спасибо Н. А. Айрапетовой за внимание и помощь. Также я благодарю Ж.-А. М. Джилкибаева, И. А. Белолоптикова и Б. А. Шайбонова за замечания и помощь в обработке и анализе данных установки. Я благодарен Э. А. Осиповой за помощь в разработке мюонной калибровки Baikal-GVD. Большая благодарность К. Конищеву за помощь в обработке результатов моделирования и тёплую компанию. Я выражаю благодарность А. И. Панфилову за поддержку и помощь в анализе акустических данных и руководство при установке телескопа. Я очень признателен О. В. Суворовой за содействие в анализе полученных данных. Спасибо Ф. Шамахову и А. Смагиной за помощь в разработке программного обеспечения и Е. Плисковскому за создание программы управления телескопом. Я благодарен своим коллегам, Ф. Кошелю, А. Шейфлеру, К. Голубкову и К. Кулешову за подготовку и тестирование аппаратуры телескопа, а также за помощь в установке телескопа.

Наконец, я хотел бы выразить признательность всем участникам коллаборации Байкал, чья работа сделала эту диссертацию возможной. Безусловно благодарю всех родных и близких, которые дали возможность выполнить эту работу.

Список литературы

- [1] Vladimir Aynutdinov и др. “The BAIKAL neutrino experiment: From NT200 to NT200+”. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 567.2 (2006), с. 433—437.
- [2] E Andres и др. “The AMANDA neutrino telescope: principle of operation and first results”. В: *Astroparticle Physics* 13.1 (2000), с. 1—20.
- [3] IceCube Collaboration и др. “IceCube preliminary design document”. В: *The IceCube Collaboration* (2001).
- [4] Paschal Coyle. “The ANTARES deep-sea neutrino telescope: Status and first results”. В: *arXiv preprint arXiv:1002.0754* (2010).
- [5] MG Aartsen и др. “First observation of PeV-energy neutrinos with IceCube”. В: *Physical review letters* 111.2 (2013), с. 021103.
- [6] Ж.-А. М. Джилкибаев, Г. В. Домогацкий и О. В. Суворова. “Черенковские детекторы в нейтринной астрофизике высоких энергий”. В: *Успехи физических наук* 185.5 (2015), с. 531—539.
- [7] S Fukuda и др. “The super-kamiokande detector”. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 501.2 (2003), с. 418—462.
- [8] J Boger и др. “The Sudbury neutrino observatory”. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 449.1 (2000), с. 172—207.
- [9] EN Alekseev, LN Alekseeva и др. “The Baksan underground scintillation telescope”. В: *Physics of Particles and Nuclei* 29.3 (1998), с. 254—256.
- [10] MA Markov. “On high energy neutrino physics”. В: *Proceedings of the 1960 Annual International Conference on HEP at Rochester*. 1960, с. 578—581.
- [11] A. Roberts. “The Birth of high-energy neutrino astronomy: A Personal history of the DUMAND project”. В: *Rev. Mod. Phys.* 64 (1992), с. 259—312.
- [12] Christian Spiering. “High energy neutrino astronomy: status and perspectives”. В: *arXiv preprint arXiv:0811.4747* (2008).

- [13] Baikal Collaboration и др. “Reconstruction of atmospheric neutrinos with the Baikal Neutrino Telescope NT-96”. В: *arXiv preprint astro-ph/9705244* (1997).
- [14] F Piquemal, NEMO collaboration и др. “Results from the NEMO experiment”. В: *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements* 77.1 (1999), с. 352—356.
- [15] Peter KF Grieder. “NESTOR neutrino telescope status report”. В: *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements* 97.1 (2001), с. 105—108.
- [16] Adrian Jacob Heijboer. *Track reconstruction and point source searches with ANTARES*. Тех. отч. Universiteit van Amsterdam, 2004.
- [17] Annarita Margiotta, KM3NeT Collaboration и др. “The KM3NeT deep-sea neutrino telescope”. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 766 (2014), с. 83—87.
- [18] Eike Middell. “Reconstruction of cascade-like events in icecube”. В: *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* (2009).
- [19] J Ahrens и др. “Muon track reconstruction and data selection techniques in AMANDA”. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 524.1 (2004), с. 169—194.
- [20] W-M Yao et al. “Review of Particle Physics”. В: *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* 33.1 (2006), с. 1. URL: <http://stacks.iop.org/0954-3899/33/i=1/a=001>.
- [21] Francis Halzen. “The AMANDA neutrino telescope”. В: *New Astronomy Reviews* 42.3 (1998), с. 289—299.
- [22] Rene Brun и др. “PAW, a general-purpose portable software tool for data analysis and presentation”. В: *Computer Physics Communications* 57.1 (1989), с. 432—437.
- [23] Patrick Berghaus и др. “Status and Results from AMANDA/IceCube”. В: *arXiv preprint arXiv:0712.4406* (2007).
- [24] Abraham Achterberg и др. “First year performance of the IceCube neutrino telescope”. В: *Astroparticle Physics* 26.3 (2006), с. 155—173.

- [25] Albrecht Karle и др. “IceCube—the next generation neutrino telescope at the South Pole”. В: *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements* 118 (2003), с. 388—395.
- [26] Elisa Resconi, IceCube Collaboration и др. “Status and prospects of the IceCube neutrino telescope”. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 602.1 (2009), с. 7—13.
- [27] Christopher Wiebusch и др. “Physics capabilities of the IceCube DeepCore detector”. В: *arXiv preprint arXiv:0907.2263* (2009).
- [28] Rasha Abbasi и др. “The design and performance of IceCube DeepCore”. В: *Astroparticle physics* 35.10 (2012), с. 615—624.
- [29] Rasha Abbasi и др. “The IceCube data acquisition system: Signal capture, digitization, and timestamping”. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 601.3 (2009), с. 294—316.
- [30] K Hanson и O Tarasova. “Design and production of the IceCube digital optical module”. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 567.1 (2006), с. 214—217.
- [31] Francis Halzen и Spencer R Klein. “Invited review article: IceCube: an instrument for neutrino astronomy”. В: *Review of Scientific Instruments* 81.8 (2010), с. 081101.
- [32] T DeYoung и др. “IceTray: a software framework for IceCube”. В: *International Conference on Computing in High-Energy Physics and Nuclear Physics (CHEP2004)*. 2004, с. 52.
- [33] D. Zaborov. *The ANTARES experiment in the Mediterranean sea: overview and first results*. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/conf/lpp14/200809/Zaborov.pdf>. 2009.
- [34] Emilio Migneco и др. “Status of NEMO”. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 567.2 (2006), с. 444—451.

- [35] SE Tzamarias. “NESTOR: a deep-sea neutrino telescope”. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 502.1 (2003), с. 150—154.
- [36] P Bagley и др. “KM3NeT technical design report for a deep-sea research infrastructure in the Mediterranean sea incorporating a very large volume neutrino telescope”. В: (2011).
- [37] UF Katz, KM3NeT Consortium и др. “Status of the KM3NeT project”. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 602.1 (2009), с. 40—46.
- [38] Els de Wolf. “KM3NeT, a new generation neutrino telescope”. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 588.1 (2008), с. 86—91.
- [39] IA Belolaptikov и др. “The Baikal underwater neutrino telescope: Design, performance, and first results”. В: *Astroparticle Physics* 7.3 (1997), с. 263—282.
- [40] V Aynutdinov и др. “BAIKAL experiment: Main results obtained with the neutrino telescope NT200”. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 567.2 (2006), с. 423—427.
- [41] V Aynutdinov и др. “Search for a diffuse flux of high-energy extraterrestrial neutrinos with the NT200 neutrino telescope”. В: *Astroparticle Physics* 25.2 (2006), с. 140—150.
- [42] RI Bagduev и др. “The optical module of the Baikal deep underwater neutrino telescope”. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 420.1 (1999), с. 138—154.
- [43] ИА Белолоптиков. “О выделении событий от мюонных нейтрино в глубоководном нейтринном телескопе НТ200.” В: *Препринт ИЯИ-1178, ISBN978-5-94274-033-7, Москва* (2007).

- [44] A Avrorin, V Aynutdinov и др. “The Baikal neutrino experiment”. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 626 (2011), S13–S18.
- [45] AV Avrorin и др. “Status of the BAIKAL neutrino experiment”. В: *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* 75.3 (2011), с. 414–415.
- [46] AD Avrorin и др. “The first construction phase of the Baikal-GVD neutrino telescope”. В: *this Proceedings*. 2015.
- [47] AD Avrorin и др. “Status and recent results of the Baikal-GVD project”. В: *Physics of Particles and Nuclei* 46.2 (2015), с. 211–221.
- [48] AV Avrorin и др. “Current status of the BAIKAL-GVD project”. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 725 (2013), с. 23–26.
- [49] AV Avrorin и др. “Status of the Baikal-GVD project”. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 692 (2012), с. 46–52.
- [50] V Aynutdinov и др. “The Baikal neutrino project: Present and perspective”. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 628.1 (2011), с. 115–119.
- [51] A Avrorin и др. “The gigaton volume detector in Lake Baikal”. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 639.1 (2011), с. 30–32.
- [52] V Aynutdinov и др. “The Baikal Neutrino experiment: NT200+ and beyond”. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 572.1 (2007), с. 511–514.
- [53] V Aynutdinov и др. “The prototype string for the km 3-scale Baikal neutrino telescope”. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 602.1 (2009), с. 227–234.

- [54] V Aynutdinov и др. “The Baikal neutrino experiment: Status, selected physics results, and perspectives”. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 588.1 (2008), с. 99—106.
- [55] AV Avrorin и др. “Data acquisition system of the NT1000 Baikal neutrino telescope”. В: *Instruments and Experimental Techniques* 57.3 (2014), с. 262—273.
- [56] A.D. Avrorin и др. “The optical module of Baikal-GVD”. В: *EPJ Web of Conferences* 116 (2016).
- [57] Claudio Kopper. “A software framework for KM3NeT”. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 602.1 (2009), с. 107—110.
- [58] T Bretz, R Wagner, MAGIC collaboration и др. “The MAGIC analysis and reconstruction software”. В: *International Cosmic Ray Conference*. Т. 5. 2003, с. 2947.
- [59] Thomas Bretz и Daniela Dorner. “MARS—The Cherenkov Observatory edition”. В: *HIGH ENERGY GAMMA-RAY ASTRONOMY: Proceedings of the 4th International Meeting on High Energy Gamma-Ray Astronomy*. Т. 1085. 1. AIP Publishing. 2008, с. 664—667.
- [60] Juan Cortina. “Status and first results of the MAGIC telescope”. В: *Astrophysics and Space Science* 297.1-4 (2005), с. 245—255.
- [61] Carmen Baixeras, Magic Collaboration и др. “The MAGIC telescope”. В: *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements* 114 (2003), с. 247—252.
- [62] AD Avrorin и др. “The prototyping/early construction phase of the BAIKAL-GVD project”. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 742 (2014), с. 82—88.
- [63] А. Аврорин и др. “Гидроакустическая система позиционирования экспериментального кластера нейтринного телескопа масштаба кубического километра на озере”. В: *Приборы и техника эксперимента* 4 (2013), с. 87—97.

- [64] Pablo Achard и др. “Measurement of the atmospheric muon spectrum from 20 to 3000 GeV”. В: *Physics Letters B* 598.1 (2004), с. 15–32.
- [65] Thomas Hebbeker и Charles Timmermans. “A compilation of high energy atmospheric muon data at sea level”. В: *Astroparticle Physics* 18.1 (2002), с. 107–127.
- [66] AD Avrorin и др. “Search for neutrino emission from relic dark matter in the sun with the Baikal NT200 detector”. В: *Astroparticle Physics* 62 (2015), с. 12–20.
- [67] AD Avrorin и др. “Sensitivity of the Baikal-GVD neutrino telescope to neutrino emission toward the center of the galactic dark matter halo”. В: *JETP Letters* 101.5 (2015), с. 289–294.
- [68] Pietro Baratella и др. “PPPC 4 DM: a Poor Particle Physicist Cookbook for Neutrinos from Dark Matter annihilations in the Sun”. В: *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2014.03 (2014), с. 053. URL: <http://stacks.iop.org/1475-7516/2014/i=03/a=053>.
- [69] Samuel S Wilks. “The large-sample distribution of the likelihood ratio for testing composite hypotheses”. В: *The Annals of Mathematical Statistics* 9.1 (1938), с. 60–62.
- [70] Rene Andrae, Tim Schulze-Hartung и Peter Melchior. “Dos and don’ts of reduced chi-squared”. В: *arXiv preprint arXiv:1012.3754* (2010).

Список рисунков

1.1	Природные потоки нейтрино на уровне Земли [6]	11
1.2	Восходящий мюон, зарегистрированный Байкальским нейтринным телескопом [13]	12
1.3	Принцип работы нейтринного телескопа [16]	16
1.4	Типы событий, регистрируемых нейтринными телескопами (по данным моделирования IceCube [18]). Точки обозначают фотодетекторы, сферы - сработавшие фотодетекторы. Цвет сферы (от красного к фиолетовому) соответствует времени срабатывания. .	16
1.5	Движение заряженной частицы в среде [18]. c - скорость света в вакууме, n - показатель преломления среды	18
1.6	Спектральная зависимость показателя поглощения (а) и показателя рассеяния (б) байкальской воды, антарктического льда и воды Средиземного моря	19
1.7	Детектор AMANDA-II [19]	20
1.8	Зависимость переднего времени фронта импульса ФЭУ от амплитуды [2]	21
1.9	Определение координат ОМ в AMANDA [2]	22
1.10	Индекс рассеяния и поглощения антарктического льда [18]	23
1.11	Последовательность обработки данных в AMANDA [19]	24
1.12	Структура IceCube [3, 23]	25
1.13	Детектор ANTARES [16]	27
1.14	Оптический модуль ANTARES [16]	28
1.15	Краткосрочные колебания фоновых шумов в ANTARES [33]	29
1.16	Детектор NT200+	33
2.1	Расположение БНО на оз. Байкал и рельеф дна озера в месте дислокации установки.	34
2.2	Кластер Baikal-GVD, сформированный из 8 гирлянд.	36
2.3	Крепление глубоководного модуля на нержавеющей кабель-трос с помощью <i>рамы</i>	37
2.4	Фотография глубоководных модулей центра кластера.	38

2.5	Схема кластера, установленного в оз. Байкал в 2015 году, и планируемая конфигурация детектора Baikal-GVD.	39
2.6	Общий вид оптического модуля.	40
2.7	Функциональная схема оптического модуля.	41
2.8	Характеристики ОМ, измеренные в лабораторных условиях.	43
2.9	Схема секции Baikal-GVD	44
2.10	Функциональная схема платы управления оптического модуля Baikal-GVD.	45
2.11	Пример мониторинговой гистограммы	46
2.12	Пример временного кадра канала	47
2.13	Блок-схема коммутационного модуля гирлянды	48
2.14	Блок-схема центра кластера	49
2.15	Схема формирования триггера секции.	52
2.16	Вид матрицы совпадений для двух режимов работы триггерной системы	53
2.17	Схема организации триггера и передачи данных установки	53
2.18	Распределение измеренных значений темпа счёта 72 ОМ, установленных в оз. Байкал	55
2.19	Зависимость темпов счёта ОМ от времени в разные сезоны	56
2.20	Пример зависимости фактора ослабления шумов ОМ P от порога регистрации	56
2.21	Распределение фактора ослабления шумов P для порога 3 ф.э.	56
2.22	Зависимость эффективной площади кластера Baikal-GVD от энергии мюонов для синхронного триггера с порогами 0.5/3 ф.э. (чёрн.) и асинхронных триггеров с порогами 0.5/0.5 (син.), 0.5/2 (зел.) и 0.5/3 ф.э. (красн.). Эффективная площадь вычисляется для событий, содержащих не менее 6 каналов на 3 гирляндах (необходимо для восстановления направления мюона).	59
2.23	Ледовый лагерь экспедиции 2016 г.	60
2.24	Подготовка ледового лагеря 2016 г.	62
2.25	Крепление гирлянд телескопа к поверхности	62
2.26	Монтаж элементов гирлянды Baikal-GVD, 2015 г.	64
3.1	Общая архитектура MARS	67
3.2	Принцип работы цикла событий MARS	70

3.3	Архитектура BARS	70
3.4	Предварительная обработка в BARS	72
4.1	Измерительный канал Baikal-GVD	78
4.2	Пример осциллограмм входного и выходного сигналов, полученных при измерении параметров кабеля	79
4.3	Распределение кабелей по величине выходного сигнала	80
4.4	Вычисленные амплитудные калибровочные коэффициенты каналов q_{1e} установки 2014 года (слева) и распределение каналов по величине q_{1e} (справа)	82
4.5	Блок электроника ОМ, установленный на цоколь ФЭУ, оснащенный двумя калибровочными светодиодными источниками света; схема временной калибровки при помощи светодиода; временные кадры, зарегистрированные на АЦП соседних каналов.	84
4.6	Результаты временной калибровки каналов установки 2014 года.	84
4.7	Временной кадр с тестовым импульсом и сигналом с ФЭУ от светодиода (сигнал запуска светодиода задержан на ~ 500 нс).	85
4.8	Разность между задержками каналов, полученными при помощи светодиодной калибровки (dT_{LED}) и с использованием тестового импульса (dT_{TST}) в зависимости от номера канала.	86
4.9	Размещение светодиодной матрицы в установке 2014 года.	87
4.10	Измеренные $(T - T_0)_{185}$ и рассчитанные $(T - T_0)_{EXP}$ временные задержки между каналами, расположенными на разных гирляндах (слева) и величина временной сдвижки между секциями, измеренная по разным парам каналов.	87
4.11	Координаты верхнего акустического модуля гирлянды 2 кластера “Дубна”. Сеанс 556, 2015.	88
4.12	Схема системы сбора данных гирлянды GVD. АМ - акустические модемы, СМ - модули секции, SM - модуль гирлянды.	89
4.13	Плотность акустических записей до и после выравнивания	91
4.14	Короткий (2.5 часа) пробел в акустических записях маяка №15, 2015 год	93
4.15	пример аппроксимации x-координаты акустического маяка, 2015 год	93
4.16	Расстояние между верхним и нижним маяками гирлянды №3, 2015 год	94
4.17	Плотность акустических записей, 2016 год	95

4.18	Плотность акустических записей до и после выравнивания	96
4.19	Темпы счёта шумов, 2014 г.	97
4.20	Схема работы модуля фильтрации данных Baikal-GVD	97
5.1	Эффективная площадь кластера Baikal-GVD к нейтрино из галактического центра для разных каналов аннигиляции.	100
5.2	Распределение событий от нейтринного и фонового сигнала в зависимости от угла отклонения от центра галактики.	101
5.3	Чувствительность Baikal-GVD к $\langle \sigma\nu \rangle$ в течение года для разных каналов аннигиляции	101
5.4	Статистика набора экспериментальных данных кластером Baikal-GVD в синхронном режиме работы гирлянд при триггерных порогах 1.5/4 ф.э.	102
5.5	Примеры распределений временных интервалов между событиями. Сплошная линия - результат фитирования данных экспоненциальной зависимостью.	103
5.6	Распределение количества событий, зарегистрированных в фиксированные интервалы времени (0.31 с) в течение сеанса 340. Сплошная линия - фитирование пуассоновским распределением, $\lambda = 10$	104
5.7	Временные распределения между сигналами на соседних каналах секций: разрешающее время схемы совпадений 200 нс.	104
5.8	Примеры экспериментального (красн.) и модельного (синее) ΔT распределений	106
5.9	Зависимость целевых функций от τ для данных кластера 2013 г.	108
5.10	Пример M_{min}	110
5.11	Зависимость межканальных сдвижек от номера сеанса, 2014 г.	112
5.12	Примеры распределений значений $M_{min}(\tau)$ для двух пар каналов по данным 2014 года, $\tau \in [-300; 300]$. Значение $M_{min}(\tau)$ равно интегралу пересечения нормированных ΔT распределений модели и эксперимента при сдвигке экспериментального распределения на τ нс.	113
5.13	Модельное (синее) и экспериментальное (красн.) ΔT -распределения	113
5.14	Модельное (синее) и калиброванное экспериментальное (красн.) ΔT -распределения	113

5.15	Модельное (синее) и экспериментальное (красн.) ΔT -распределения в интегральной форме	114
5.16	Модельное (синее) и калиброванное экспериментальное (красн.) ΔT -распределения в интегральной форме	114
5.17	Зависимость задержки от номера канала. Красный - мюонные задержки, синий - светодиодные.	114
5.18	Мюонные сдвиги 2014/2015 (гирлянда №3)	115
5.19	Примеры ΔT распределений для данных 2014/2015 года	115
5.20	Методика проверки корректности формирования событий по параметру	116
5.21	Распределение событий по параметру Δt	117
5.22	Параметризация мюонной траектории [43]	119
5.23	Примеры восстановленных мюонных событий (2015 г.)	120

Список таблиц

1	Частота формирования сигнала <i>запрос</i> секции	57
2	Пример измерения параметров кабельных коммуникаций каналов . .	80
3	Среднеквадратичные отклонения распределений разности временных интервалов между записями АЦП (относительно записей АЦП центра кластера)	118