

На правах рукописи

**Аврорин
Александр Дмитриевич**

**Регистрация мюонов на глубоководном
нейтринном телескопе BAIKAL-GVD**

01.04.01 — Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2016

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

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатория нейтринной астрофизики высоких энергий ИЯИ РАН *Айнутдинов Владимир Маратович*.

Официальные оппоненты:

Шаулов Сергей Борисович, д. ф.-м. н., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук, г. Москва, заведующий лабораторией адронной астрофизики.

Шитов Юрий Александрович, к. ф.-м. н., Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, старший научный сотрудник лаборатории ядерных проблем им. В. П. Джелепова.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте www.inr.ru.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.119.01
доктор физико-математических наук

С. В. Троицкий

Общая характеристика работы

Актуальность работы

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 NT200, 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.

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 угловым разрешением восстановления мюонных траекторий. Это связано с тем, что длина рассеяния света в антарктическом льду мала по сравнению с озёрной и морской водой, 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 BAIKAL-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.

Цель работы

Целью диссертационной работы является разработка и программная реализация алгоритмов обработки мюонных событий, зарегистрированных Baikal-GVD.

Научная новизна работы

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 со-

глашения 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. принимал активное участие в создании первого кластера нейтринного

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.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты оптимизации режима работы триггерной системы BaikalGVD 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.

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).

Публикации

Всего по теме диссертации опубликовано 5 работ в рецензируемых международных и российских журналах, их список приведён в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, списка рисунков и списка таблиц. Общий объем диссертации составляет 135 страниц, включая 89 рисунков, 3 таблицы и список цитируемой литературы из 70 ссылок.

Содержание работы

Во **Введении** приводится актуальность проделанной работы, выполняется постановка цели работы и задач, решение которых необходимо для её достижения. Приводится практическая значимость и научная новизна полученных результатов, а также перечисляются положения, вносимые на защиту.

В **первой главе** приведён обзор методов регистрации мюонов в крупномасштабных черенковских детекторах, наблюдающих естественные среды. Описаны общий принцип работы таких установок и основные оптические характеристики наблюдаемой среды. В главе описаны методы регистрации мюонов на четырёх детекторах: NT-200, AMANDA, IceCube и ANTARES.

Принцип регистрации нейтрино с энергиями более 10^9 эВ в естественных средах основан на регистрации черенковского излучения продуктов взаимодействия нейтрино с нуклонами наблюдаемой среды и резонансного рассеяния электронного антинейтрино на электроны с энергией в резонансе $E_0 = 6.3 \times 10^6$. Источниками нейтринного сигнала могут быть как астрофизические объекты, так и атмосферные нейтрино, образованные в результате распада пионов, рождённых в результате взаимодействия космических лучей с атмосферой Земли.

Релятивистские мюоны, образованные в результате таких взаимодействий, являются источниками светового поля, состоящего из излучения Вавилова-Черенкова самого мюона, а также светового поля продуктов взаимодействия мюона со средой (рождения e^+e^- -пар, тормозного и фотоядерного взаимодействий). Так как средний угол отклонения направления мюона от изначального направления мюонного нейтрино составляет $0.7(E_\nu / \text{ТэВ})$, то по зарегистрированной траектории мюона возможно восстановить траекторию первичной частицы.

Метод работы крупномасштабных нейтринных телескопов, предложенный академиком М. А. Марковым в 1960м году, основан на регистрации свечения вторичных продуктов взаимодействия нейтрино со средой с помощью решётки фотоэлектронных умножителей, погруженных в прозрачную естественную среду (антарктический лёд, озёрную или морскую воду) на глубину, достаточную для подавления фона от атмосферных мюонов (см. Рис. 1).

Глава 1 завершается описанием четырёх установок: NT-200, AMANDA, IceCube и ANTARES. Для этих установок приводится описание:

1. Методов калибровки регистрирующих каналов.
2. Триггерной системы.
3. Алгоритмов подавления шумов.
4. Систем обработки данных.
5. Особенности наблюдаемых сред.

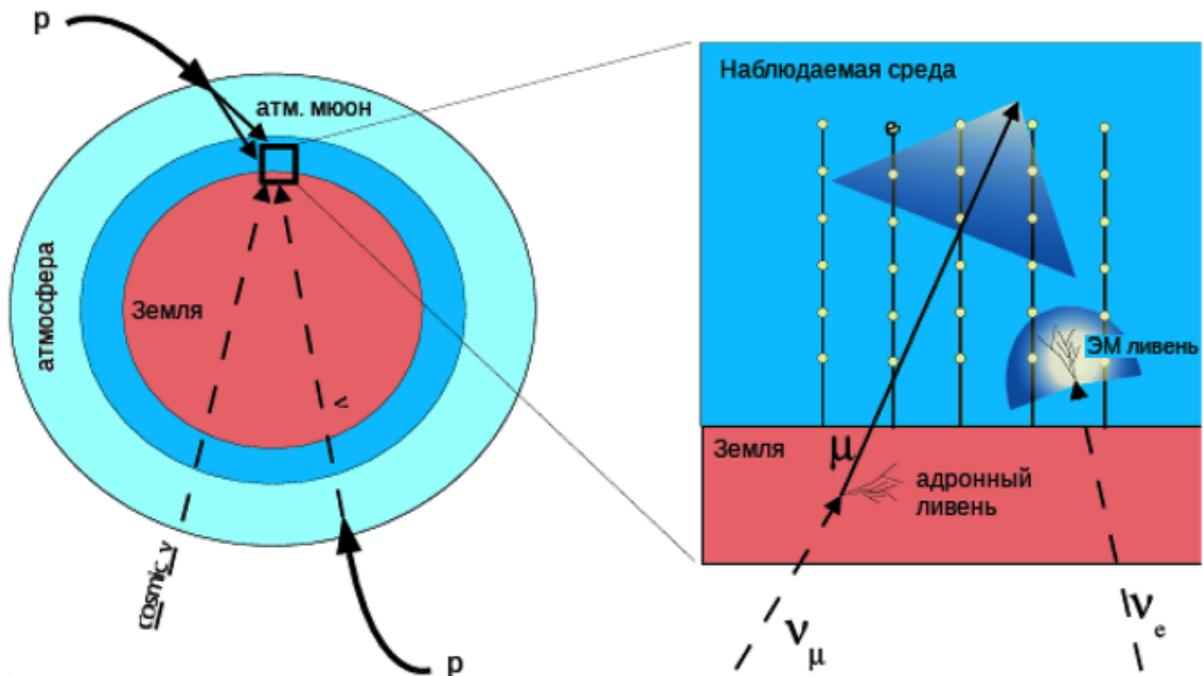


Рис. 1. Принцип работы крупномасштабных нейтринных телескопов

В главе 2 приведено описание кластера установки Baikal-GVD, описана система сбора данных и триггерная система телескопа. Показаны результаты оптимизации триггерных условий кластера для

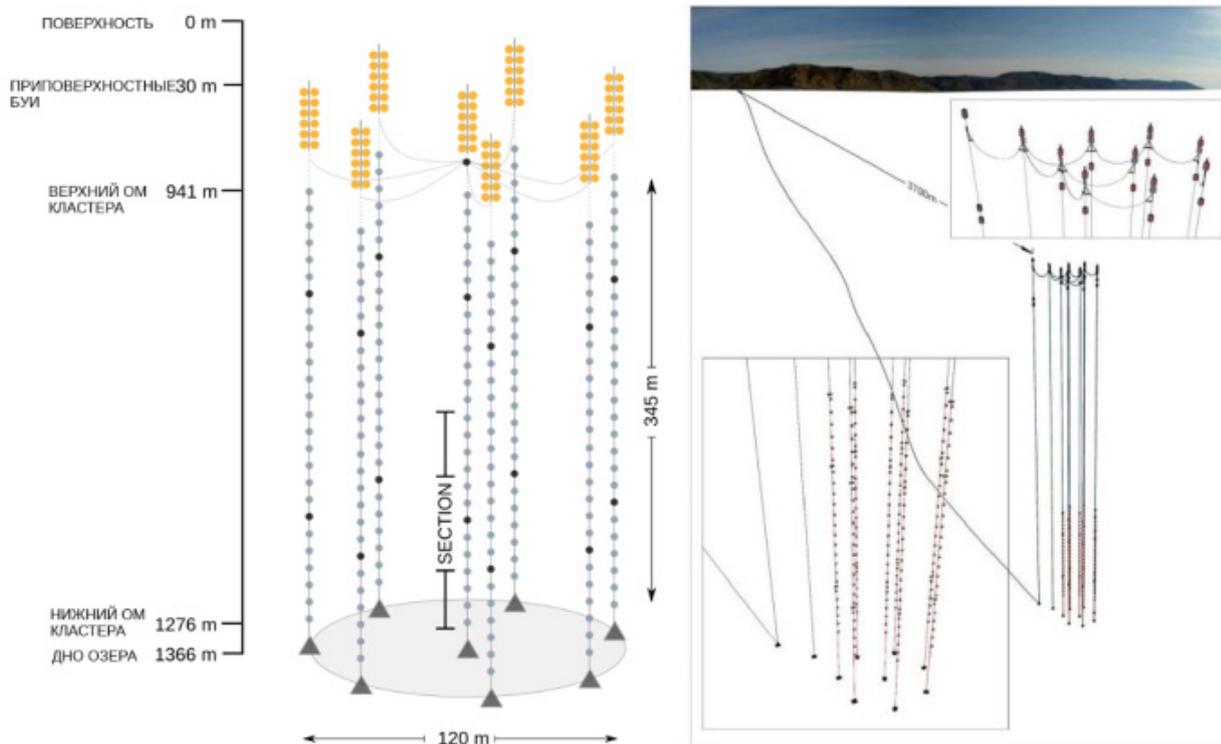


Рис.2. Кластер Baikal-GVD, сформированный из 8 гирлянд

регистрации мюонных событий. Приведено описание процедуры монтажа гирлянды телескопа.

Baikal-GVD — следующий этап развития Байкальской нейтринной обсерватории (БНО). Этот проект является продолжением детекторов NT-200 и NT-200+. Baikal-GVD расположен рядом с NT-200+, в четырёх километрах от побережья оз. Байкал. ФЭУ Baikal-GVD расположены на глубине ~ 1 км (см. Рис. 2).

Установка состоит из идентичных, функционально независимых детекторов — кластеров. Каждый кластер состоит из 8 гирлянд — 7 периферийных, расположенных по окружности радиусом 60 м, и центральной гирлянды. В конфигурации 2015 г., на каждой гирлянде с шагом 15 м расположено 24 фотоэлектронных умножителя (ФЭУ) Hamamatsu R7081-100 с полусферическими фотокатодами диаметром 25 см и квантовой эффективностью 32-34%. ФЭУ располагаются на глубинах 1276 – 941 м. На центральной гирлянде расположен центр кластера (ЦК), осуществляющий передачу данных с берега и на берег по донному оптическому каналу, а также отвечающий за формирование общего триггера установки.



Рис.3. Оптический модуль Baikal-GVD

ФЭУ установки располагаются в *оптических модулях* (ОМ) – основе регистрирующей системы Baikal-GVD. Общий вид и фотография ОМ Baikal-GVD представлены на Рис. 3.

ОМ гирлянды сгруппированы в секции, по 12 ОМ в каждой. Кроме оптических модулей, в секцию также входит модуль секции (ЦМ), выполняющий оцифровку сигналов ФЭУ и отвечающий за управление секцией. Каждая секция представляет собой функционально законченный узел детектора, включающий в себя системы регистрации излучения, обработки сигналов, калибровки, формирования триггера и передачи данных.

Для эффективной регистрации мюонов и каскадных ливней кластером Baikal-GVD используется триггерная система, позволяющая записывать данные от фотодетекторов только в тот период времени, когда они осуществляют регистрацию полезного физического сигнала, а не фона. Источниками фона установки служат атмосферные мюоны, свечение воды оз. Байкал и темновой ток ФЭУ. Подавление фона от атмосферных шумов (темп счёта таких событий кластером Baikal-GVD составляет порядка 50 Гц) выполняется выделением событий из нижней полусферы, обусловленных взаимодействием нейтрино, прошедших сквозь Землю. Подавление шумов от темнового тока ФЭУ и хемилюминесценции выполняется на аппаратном уровне триггерной системой, а потом, при off-line обработке, с помощью

алгоритмов подавления шумов.

Секция оптических модулей — базовый элемент триггерной системы кластера. На уровне секции в результате аппаратной обработки сигналов ФЭУ формируется локальный триггер. Схема формирования локального триггера секции представлена на Рис. 4. Локальные триггеры секций объединяются в модулях гирлянд и поступают в центр кластера, где формируется глобальный триггер.

Запрос секции поступает на счетчик запросов и передается в центр кластера, где формируется общий триггер (см. Рис. 5). Общий триггер кластера поступает на разветвитель, который формирует триггерные сигналы для всех гирлянд кластера. 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.

Такой режим работы триггерной системы, при котором формирование триггера на одной из секций ведёт к сбору данных со всей установки, называется *синхронным*. Возможен также *асинхронный* режим работы триггерной системы, при котором на берег отправляются только данные от секций, выработавших локальный триггер.

Аппаратура триггерной системы кластера Baikal-GVD позволяет варьировать условия формирования локального триггера секции. Доступно два сценария формирования локального триггера секции:

Мажоритарный. Триггер секции вырабатывается в том случае, если амплитуда сигнала ФЭУ на не менее, чем N ОМ секции превысила заданный порог в заданном временном окне.

Парный. Триггер секции вырабатывается в том случае, если в заданном временном окне амплитуда сигнала ФЭУ на паре соседних ОМ секции превысила нижний и высокий пороги L и H соответственно.

Аппаратура триггерной системы позволяет достаточно гибко управлять условиями выработки триггера кластера: кратностью совпадений каналов и гирлянд, порогами триггерных сигналов. 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.

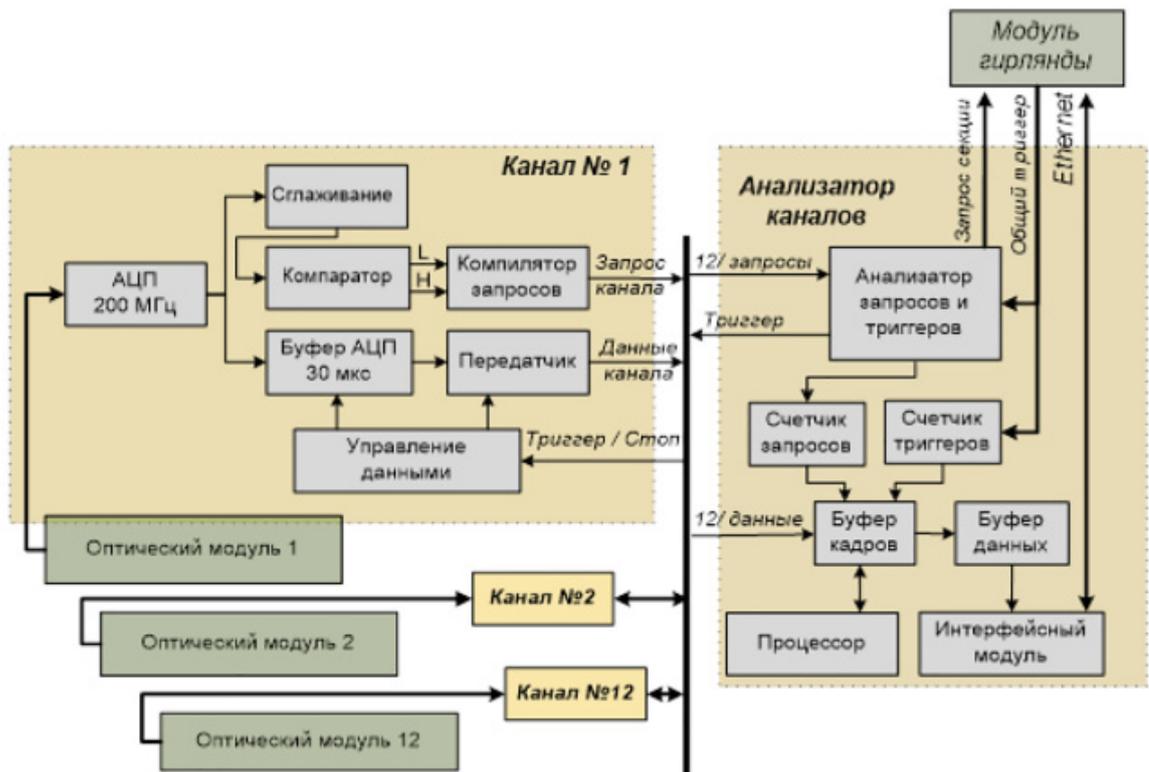


Рис. 4. Схема формирования триггера секции

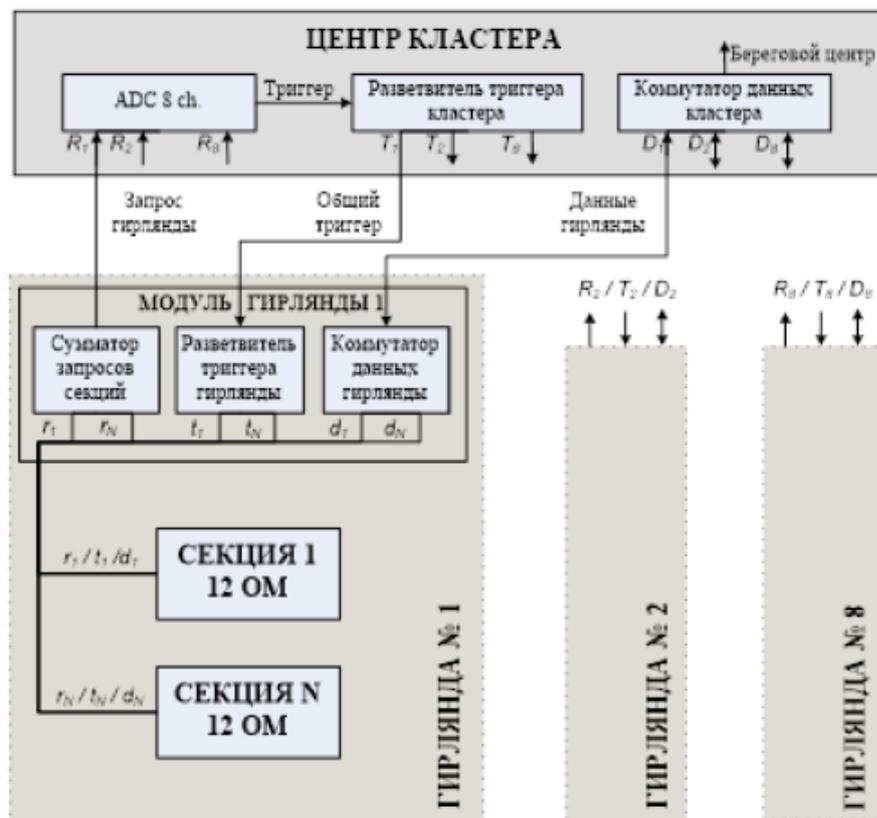


Рис. 5. Схема формирования триггера кластера

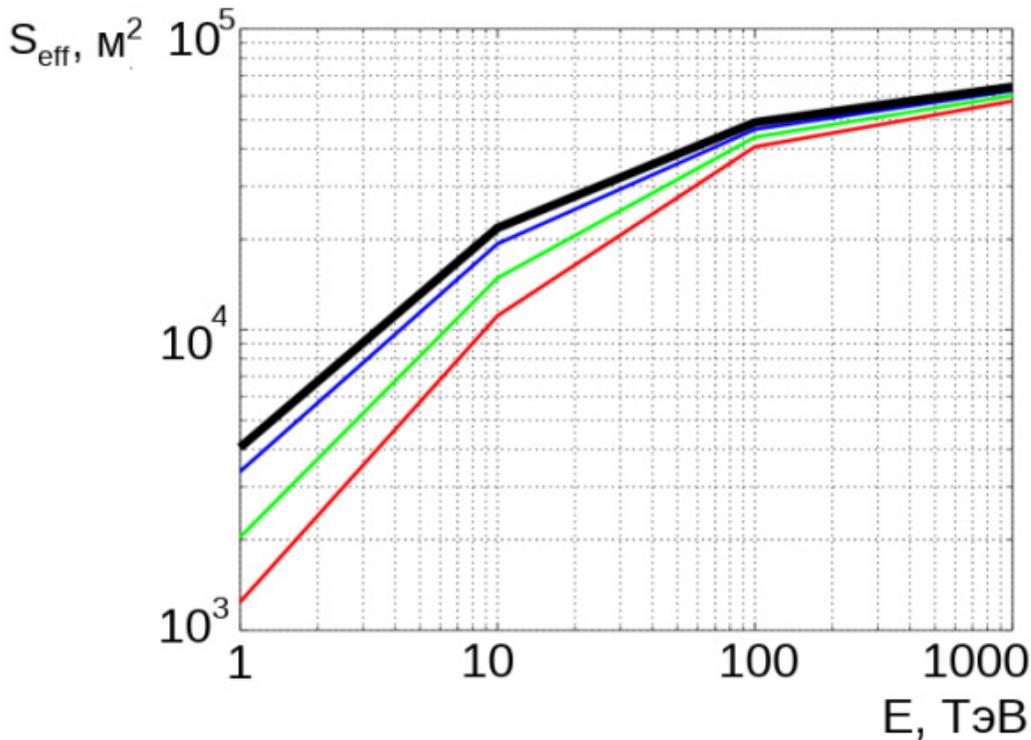


Рис. 6. Эффективная площадь кластера Baikal-GVD для различных триггерных условий

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 $F_t \sim 25$ 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.

На Рис. 6 представлена зависимость эффективной площади кластера Baikal-GVD от энергии мюонов для синхронного триггера с порогом 0.5/3 ф.э. (чёрн.) и асинхронных триггеров с порогом 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 Главе 2 также приведена последовательность монтажа и демон-

тажа гирлянд кластера. Описаны последовательность и временные рамки развёртывания полевого лагеря, монтажа и технического обслуживания гирлянд.

Глава 3 посвящена программной платформе BARS (BARS—Baikal Analysis and Reconstruction Software), предназначенной для обработки данных, полученных на Baikal-GVD.

BARS основан на MARS (MAGIC Analysis and Reconstruction Software) – библиотеке CERN ROOT, предназначенной для обработки данных эксперимента MAGIC. Основным заимствованием является принцип управления процессом обработки данных. В MARS обработка данных состоит из циклического выполнения заранее заданной последовательности модулей — специальных классов, выполняющих преобразование данных. Этот цикл завершается в том случае, если один из модулей выдаёт сигнал остановки. Такой подход называется циклом событий, так как обычно за один цикл выполняется обработка одного зарегистрированного события, а остановка цикла происходит тогда, когда все события исчерпаны.

Модули, как правило, выполняют одну задачу: чтение калибровочных таблиц, калибровка отклика детектора, чтение событий, определение шумовых импульсов и т.д. Данные в цикле событий хранятся в структурах, называемых «контейнерами». При каждом перезапуске цикла контейнеры возвращаются в исходное состояние, новых контейнеров во время цикла не создаётся. До начала цикла событий модули «подписываются» на контейнеры, с которыми они хотят взаимодействовать в цикле, и в дальнейшем могут работать только с теми контейнерами, на которые они подписаны.

BARS использует модель цикла событий MARS, а также отдельные модули (в частности, модуль чтения элементов дерева ROOT-файла). Со своей стороны, BARS добавляет специальные контейнеры для работы с данным, специфическими для Baikal-GVD и модули, реализующие алгоритмы подавления шумов, восстановления событий, определения геометрии установки и т.д. На основе этих модулей и контейнеров реализованы высокоуровневые программы обработки данных, в частности программы для объединения и восстановления событий, контроля качества работы каналов установки.

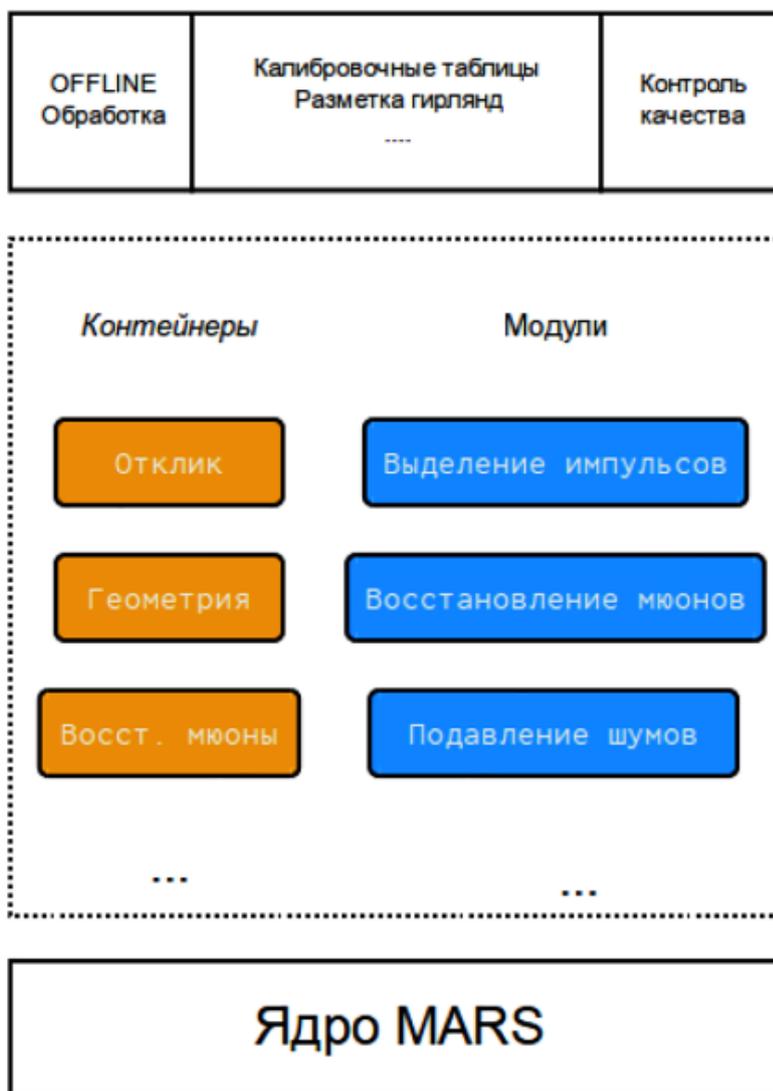


Рис. 7. Общая архитектура BARS

Общая архитектура BARS представлена на Рис. 7.

В **Главе 4** описана подготовка данных в Baikal-GVD к физическому анализу. К задачам подготовки данных относятся:

1. Определение параметров зарегистрированных импульсов по данным секции.
2. Калибровка 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.

Определение параметров импульсов

Первый этап подготовки представляет собой преобразование отклика установки в массив значений, содержащий времена и амплитуды импульсов на сработавших каналах детектора. Это преобразование позволяет на дальнейших этапах обработки рассматривать отклик установки не как набор дорожек ФЭУ, а как набор векторов, характеризующих зарегистрированные импульсы.

Калибровка

Калибровка измерительных каналов установки включает в себя временную и амплитудную калибровки. Измерительный канал состоит из следующих основных элементов (см. Рис. 8): фотоэлектронного умножителя, регистрирующего черенковское излучение заряженных частиц; усилителя сигналов ФЭУ; 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.

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



Рис. 8. Измерительный канал

фотоэлектрона, измеренная в кодах АЦП, (q_{1e}). Параметр q_{1e} называется амплитудным калибровочным коэффициентом и используется для определения количества фотоэлектронов, образовавших зарегистрированный импульс.

Для амплитудной калибровки каналов используется специальный режим работы установки, при котором на все каналы подается общий триггер от “внешнего” источника, независимо от срабатываний каналов. Результаты амплитудной калибровки 2014 года представлены на Рис. 9.

Временная калибровка состоит в определении временных сдвижек измерительных каналов, обусловленных задержками ФЭУ, АЦП и кабеля. Во время работы установки, существует три способа определения таких сдвижек:

1. С помощью калибровочных светодиодов, расположенных на ОМ.
2. С помощью внешнего источника света (светодиодной матрицы или лазера).
3. С помощью атмосферных мюонов.

Временная калибровка с помощью светодиодов, позволяет учесть вклад задержек всех составных элементов каналов. 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. 10).

Свет на верхний ФЭУ распространяется через воду, на нижний ФЭУ — через стеклянный корпус оптического модуля, который выступает в роли волновода.

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. 11 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

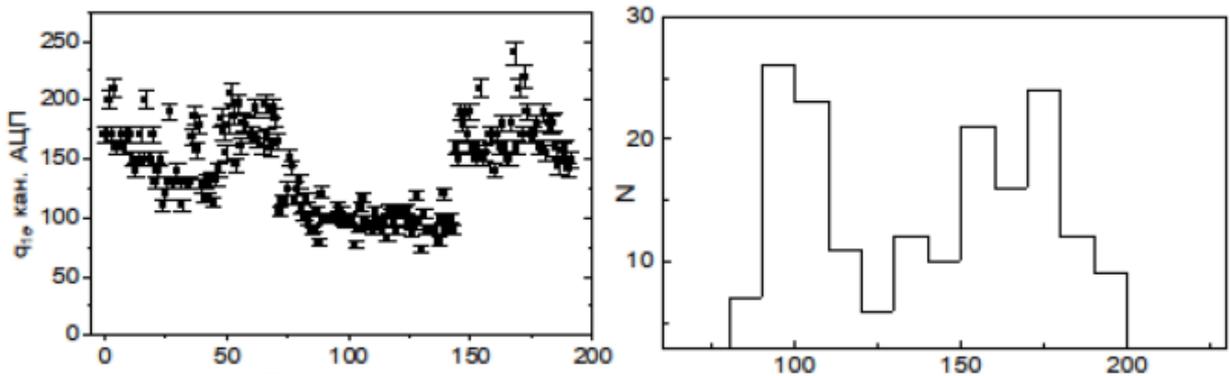


Рис.9. Вычисленные амплитудные калибровочные коэффициенты каналов q_{1e} установки 2014 года (слева) и распределение каналов по величине q_{1e} (справа)

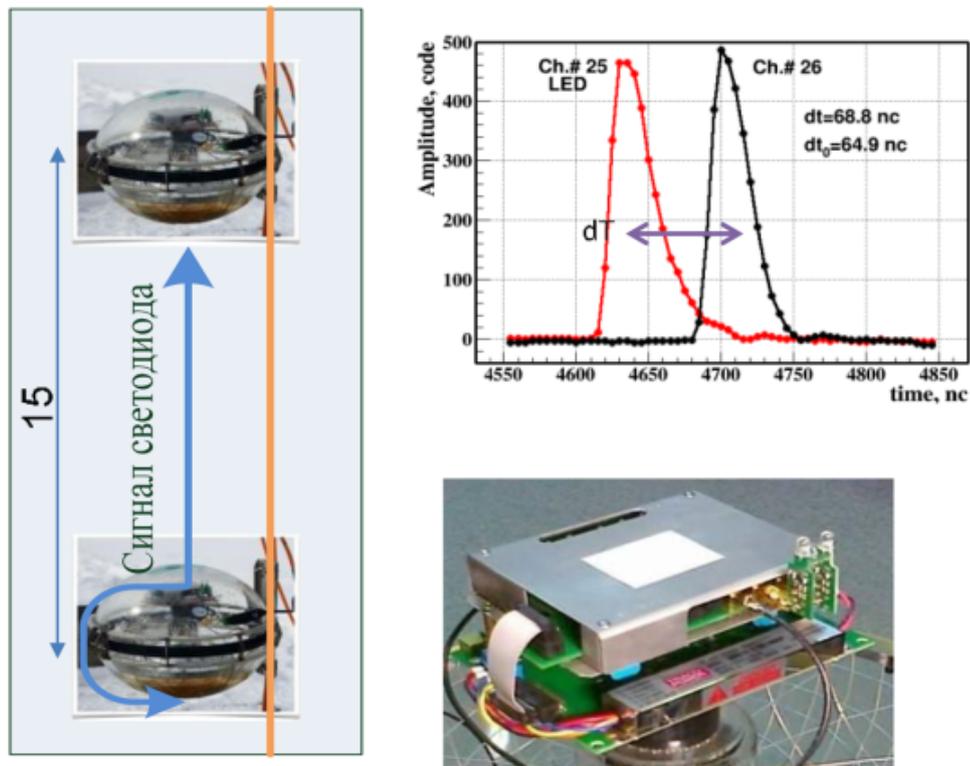


Рис.10. Схема временной калибровки с помощью светодиодов

смещения T_{SHIFT} остальных каналов.

Методика временной калибровки, описанная выше, позволяет определить временные сдвиги каналов независимо для каждой секции установки, а для определения временных сдвижек между секциями, расположенными на одной гирлянде, верхний ОМ нижней секции засвечивал нижний ОМ верхней.

Временная калибровка секций, расположенных на разных гирляндах, осуществлялась с помощью калибровочного источника, состо-

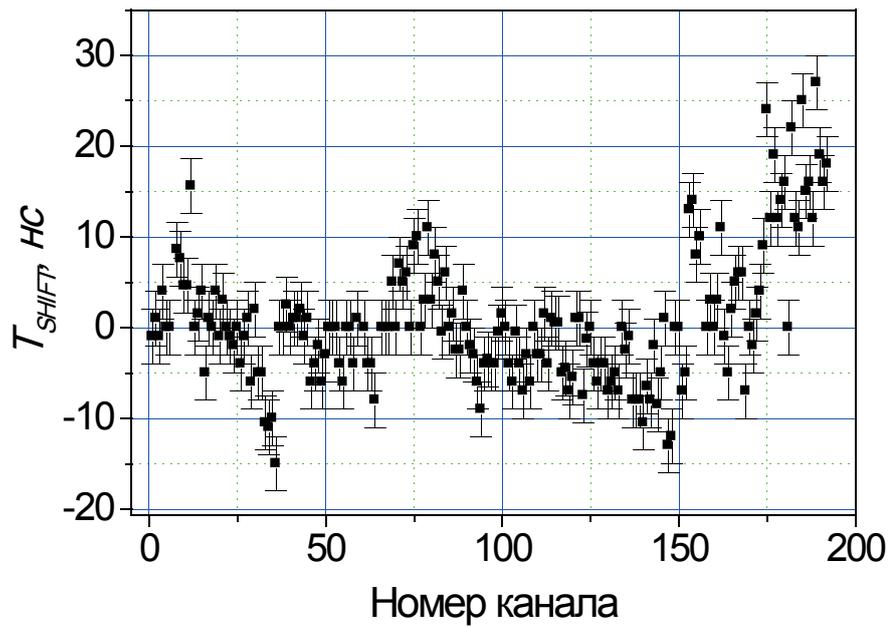


Рис. 11. Результаты временной калибровки 2014 года

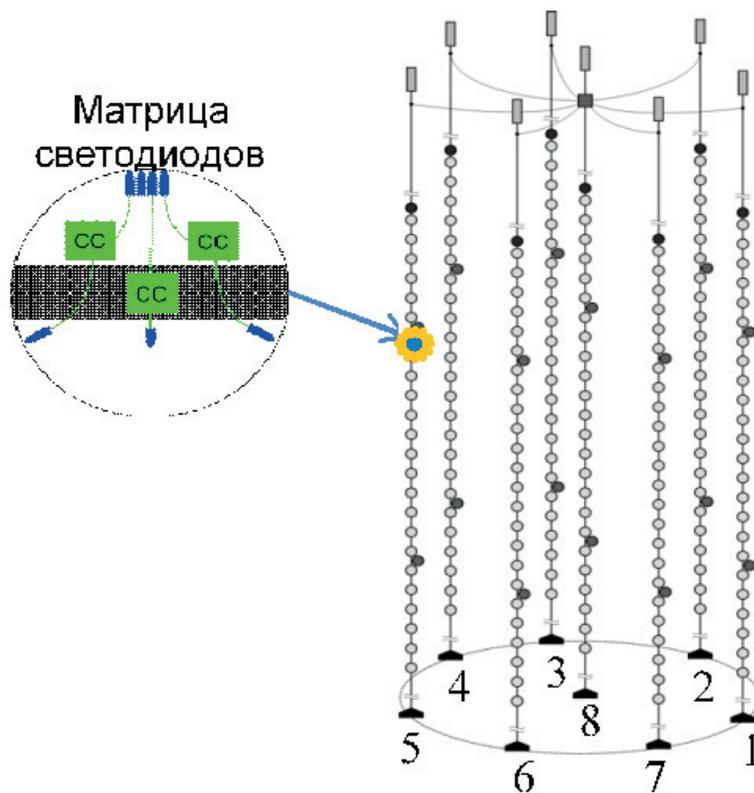


Рис. 12. Расположение светодиодной матрицы в кластере Baikal-GVD

ящего из 12 светодиодов, расположенных в отдельном глубоководном корпусе (матрицей светодиодов). Место размещения светодиодной матрицы показано на Рис. 12.

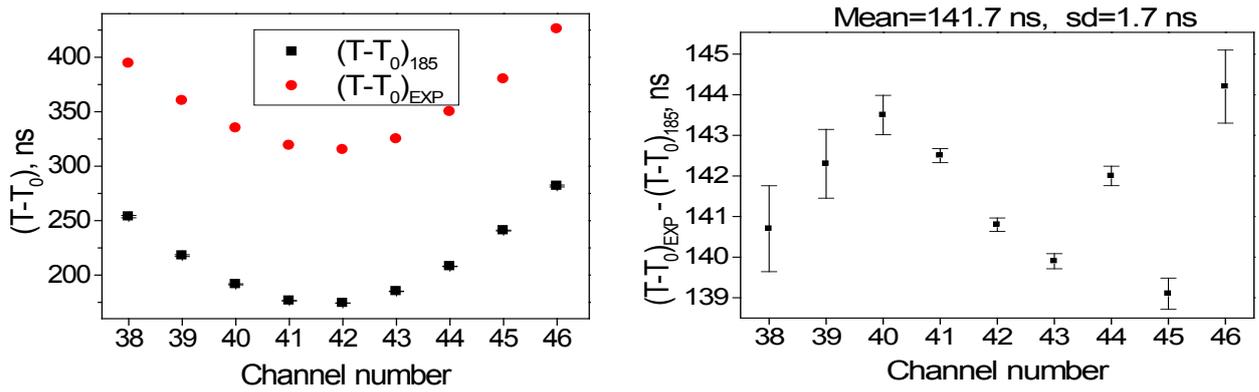


Рис. 13. Измеренные $(T-T_0)_{185}$ и рассчитанные $(T-T_0)_{EXP}$ временные задержки между каналами, расположенными на разных гирляндах (слева) и величина временной сдвиги между секциями, измеренная по разным парам каналов

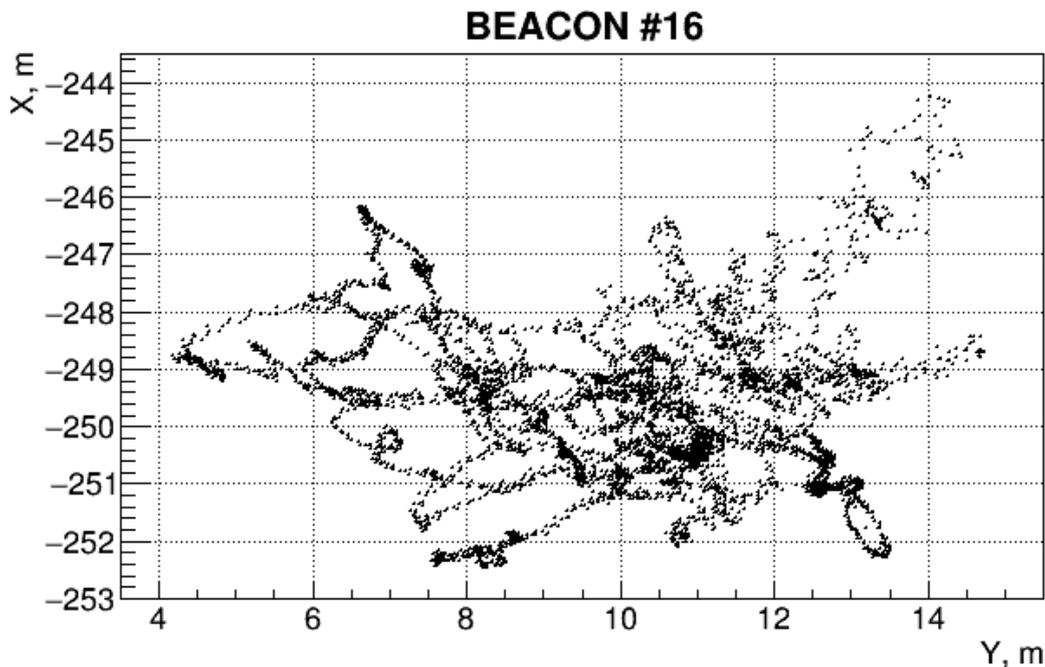


Рис. 14. Координаты акустического модема №16, сеанс 556, 2015й год

Относительные временные сдвиги секций определялись как разность между ожидаемыми (dT_{EXP}) и измеренными (dT) временными задержками между сигналами, зарегистрированными на каналах, расположенных в разных секциях. Рис. 13 иллюстрирует методику определения межсекционных 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 представ-

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

На графике, расположенном в правой части Рис. 13, представлена разность между ожидаемыми и измеренными задержками каналов. Минимальное отклонение расчетных задержек от измеренных получается при временной сдвигке между секциями 142 нс (среднеквадратичное отклонение 1.7 нс).

Определение положений фотодетекторов в момент регистрации события

В Байкальской воде ошибка в положении оптического модуля на 1 м эквивалентна временной сдвигке сигнала в 4.6 нс. В то же время, смещение оптического модуля на гирлянде может достигать 10 м. в течение одного сеанса. Для определения координат ОМ в момент регистрации в Baikal-GVD используется гидроакустическая система позиционирования, состоящая из набора акустических модемов, расположенных вдоль гирлянд установки. Приблизительно раз в минуту осуществляется последовательный опрос и восстановление относительных координат модемов. Пример таких координат представлен на Рис. 15.

Данные о координатах модемов «выравниваются», то есть интерполируются так, что через равные промежутки времени определяются координаты всех модемов установки — *акустические конфигурации* установки.

В некоторых случаях, когда с модемом долгое время нет связи, его координаты получают линейным сдвигом координат модема, расположенного на такой же глубине, так как предполагается, что гирлянды движутся параллельно друг другу (см. Рис. 15).

При подготовке события к физическому анализу, для заданного времени события определяются две ближайшие к нему *акустические конфигурации*, до и после события. Координаты ОМ получают линейной интерполяцией положений акустических модемов на заранее известную разметку гирлянд установки.

Приведение событий к единому формату и подавление шумов

После определения параметров импульсов, калибровки, формирования событий и вычисления геометрии установки в момент регистрации, событие преобразуется к стандартному представлению, которое используется для подавления шумов, выделения и восстановления событий. Это представление содержит только информацию о номере канала, заряде и времени регистрации зарегистрированных импульсов. Дополнительная информация (например, особенности формы импульсов) может использоваться в дальнейшей обработке, но стандартной структурой данных в дальнейшем будет именно такой формат.

В силу модульности BARS, подавление шумов в Baikal-GVD может осуществляться различными алгоритмами. Стандартным подходом является метод причинности, разработанный для НТ-200 и предназначенный, в первую очередь, для выделения мюонных событий. В рамках этого подхода предполагается, что разность времен любой пары импульсов в событии должна быть меньше времени распро-

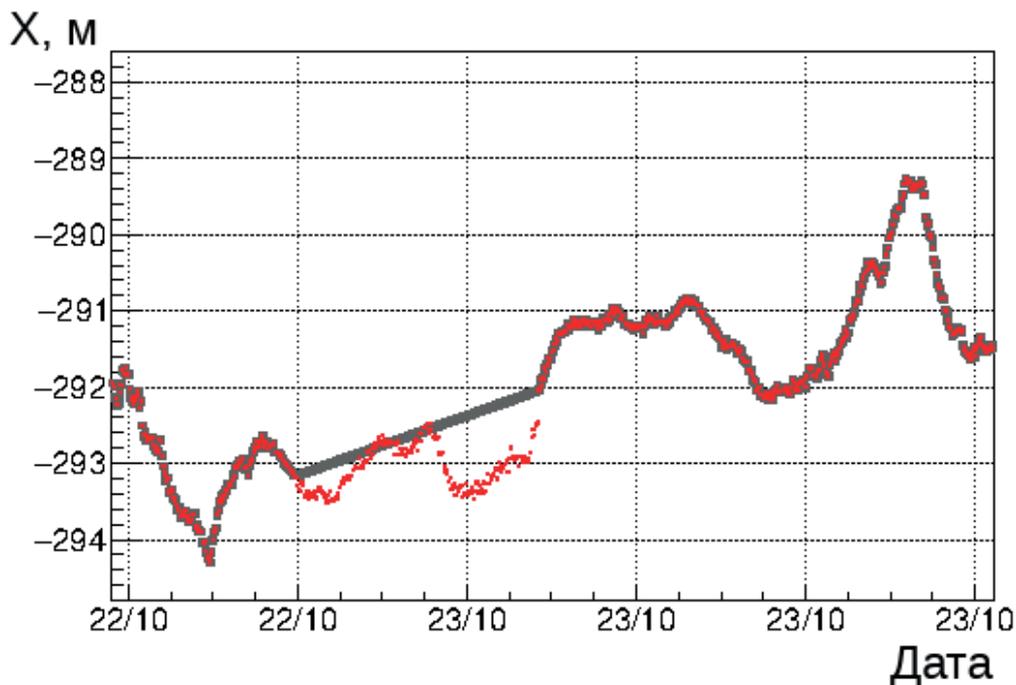


Рис. 15. Определение X-координаты неработающего акустического модема (сер.) параллельным сдвигом координат соседнего модема. Новые координаты отмечены красным цветом.

странения света между этими каналами. Это утверждение называется критерием причинности. Те импульсы, которые не удовлетворяют критерию причинности в большинстве пар, считаются шумовыми и отбрасываются.

Глава 5 посвящена анализу мюонных данных, полученных в результате регистрации продуктов взаимодействия нейтрино со средой, а также атмосферных мюонов. Атмосферные мюоны являются фоном при регистрации нейтрино астрофизической природы, однако их можно использовать для исследования отклика детектора и определения временных межканальных сдвижек. Мюонные события используются для поиска источников астрофизических нейтрино и продуктов аннигиляции слабо взаимодействующих массивных частиц (WIMP). В качестве примера физической задачи, непосредственно связанной с регистрацией мюонов, в работе приведена оценка чувствительности Baikal-GVD к сигналу от аннигиляции темной материи в Центре Галактики (Рис. 16). Оценка сделана для одного года работы телескопа Baikal-GVD, состоящего из 12 кластеров, 2304 оптических модулей, размещенных на 96 гирляндах.

Хотя целью Baikal-GVD является регистрация нейтрино от астрофизических источников, поток атмосферных мюонов также не бесполезен. Результаты регистрации секциями атмосферных мюонов можно использовать для временной калибровки каналов секции,

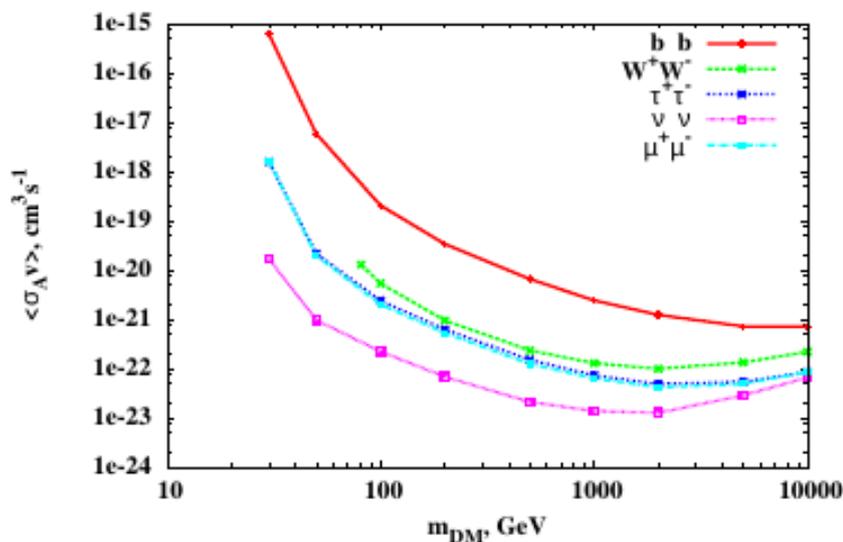


Рис. 16. Чувствительность Baikal-GVD к $\langle \sigma v \rangle$ в течение года для разных каналов аннигиляции

проверки точности моделирования и стабильности работы каналов.

Для этих целей используются ΔT -распределения — распределения задержек распространения сигнала между парой каналов по атмосферным мюонам (см. Рис. 17). Пусть ΔT_{ij}^A и ΔT_{ij}^B — распределения задержек между каналами i и j , полученные из разных наборов данных. Пусть, далее, Δt_{ij}^{AB} — расстояние между этими распределениями. Предполагая, что ΔT_{ij}^A и ΔT_{ij}^B имеют одинаковую форму, Δt_{ij}^{AB} будет равно расстоянию, на которое надо сдвинуть одно распределение, чтобы оно полностью “наложилось” на другое. Тогда:

- Если ΔT_{ij}^A получено из экспериментальных данных, а ΔT_{ij}^B — из моделирования, то Δt_{ij}^{AB} 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, выполненной другими методами (в частности, при помощи светодиодного источника света).
- Если ΔT_{ij}^A получено из экспериментальных данных, а ΔT_{ij}^B — из моделирования, то сравнение этих распределений позволяет оценить качество моделирования.
- Если ΔT_{ij}^A и ΔT_{ij}^B получены из разных наборов экспериментальных данных, то значение Δt_{ij}^{AB} позволяет оценить стабильность временной калибровки, а сравнение формы распределений — стабильность работы каналов.

Совокупность перечисленных задач называется мюонной калибровкой. Вычисление Δt_{ij}^{AB} осуществляется с помощью минимизации заранее определённой функции “расстояния” между распределениями (сдвиги ΔT -распределений относительно друг друга). В качестве таких функций используются статистика χ^2 , статистика Колмогорова-Смирнова и интеграл пересечения нормированных ΔT -распределений. Пример использования мюонной калибровки для определения изменения временных сдвижек каналов 2014–2015 гг. представлен на Рис. 18.

Результат работы установки представлен в виде потока секционных записей. Чтобы сформировать из этого потока отклик установки на одно событие, нужно определить, какие из секционных записей

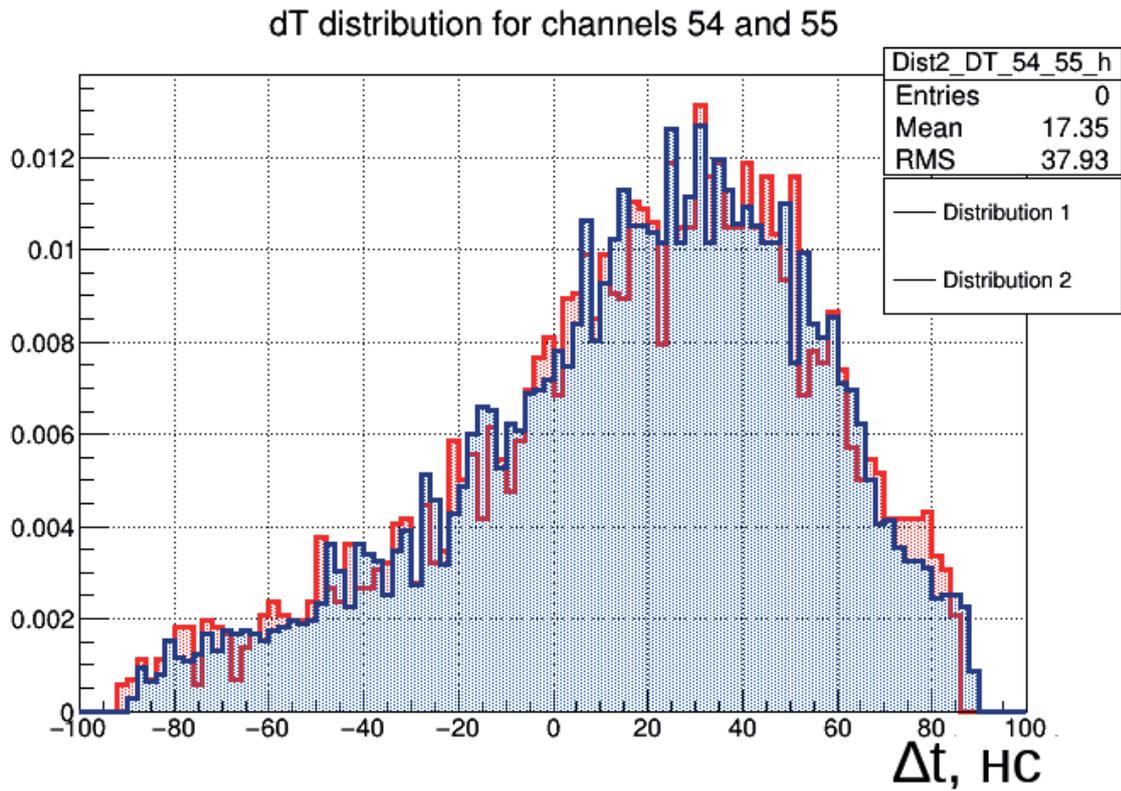


Рис.17. Примеры dT-распределений 2014/2015 гг.

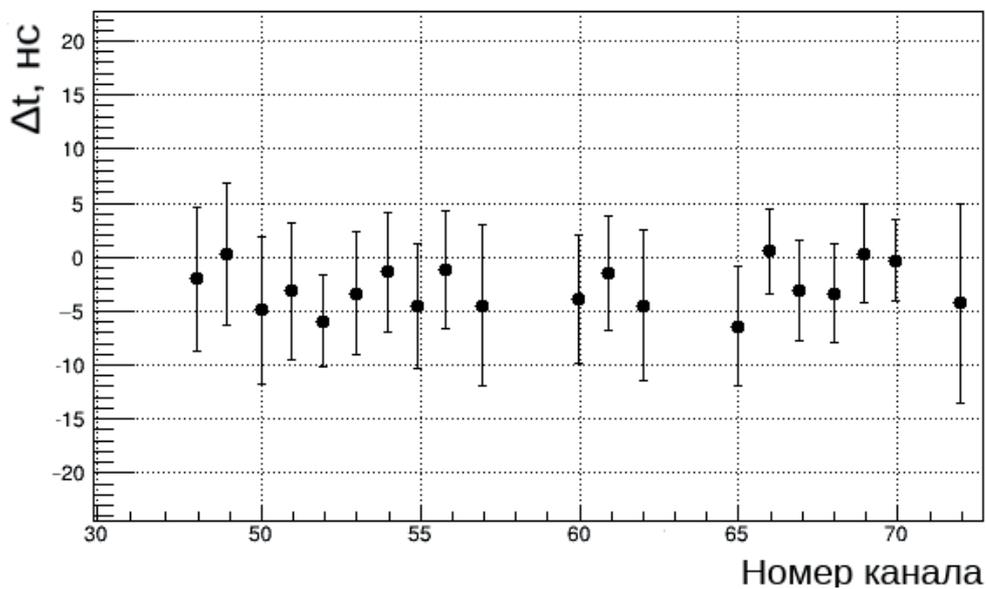


Рис.18. Мюонные сдвиги 2014/2015

сформированы общим триггером. На аппаратном уровне для этих целей в каждой записи секции содержится значение триггерного счётчика так, что записи с одинаковым значением относятся к одному событию. Однако возможные сбои в работе счетчиков и присчеты,

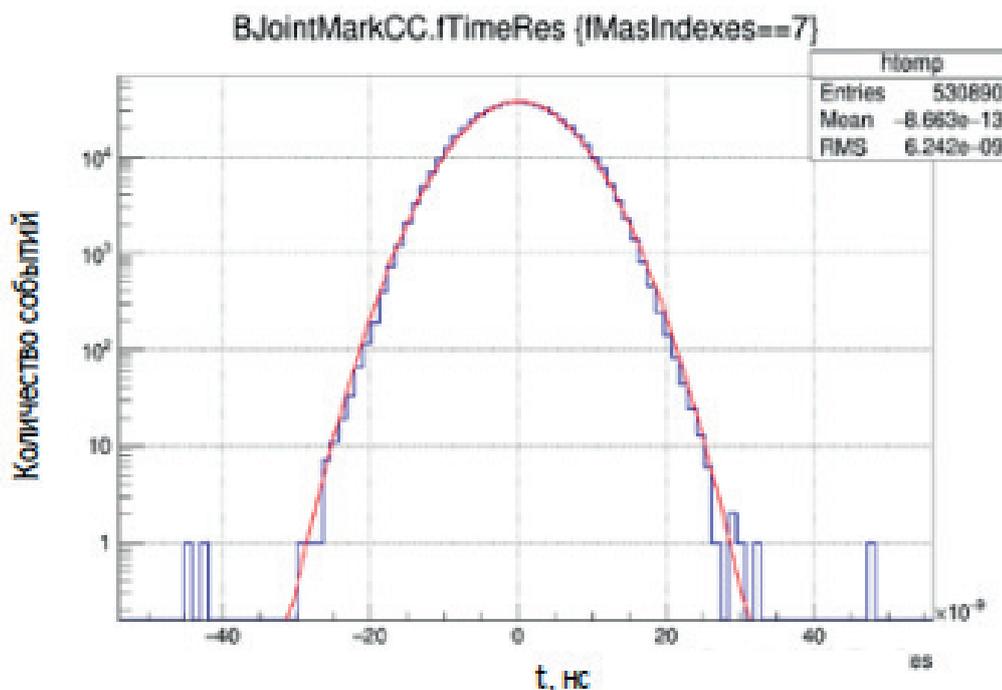


Рис. 19. Распределение событий по Δt

связанные с бросками напряжения электропитания, могут исказить значения счётчиков. Поэтому для формирования общего события можно использовать дополнительный параметр – разность времён регистрации триггера на секциях Δt .

Корректность объединения событий в серии измерений определяется по величине среднеквадратичного отклонения $\sigma(\Delta t)$, которое должно составлять величину около 6 нс. На Рис.19 представлен пример распределения значений Δt , полученного во время одной из серий измерений для двух АЦП установки.

Сформированные событие готовы к восстановлению. Процедура восстановления мюонов в Baikal-GVD в настоящий момент аналогична процедуре восстановления в NT-200 и представляет собой минимизацию χ^2 по ожидаемым временам срабатывания каналов установки:

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

Здесь T_i – ожидаемое время регистрации импульса на канале i , σ_{t_i} – ошибка измерения времени, $\hat{\mu}$ – параметризация гипотетической мюонной траектории. На Рис. 20 представлены два восстановленных мюонных события.

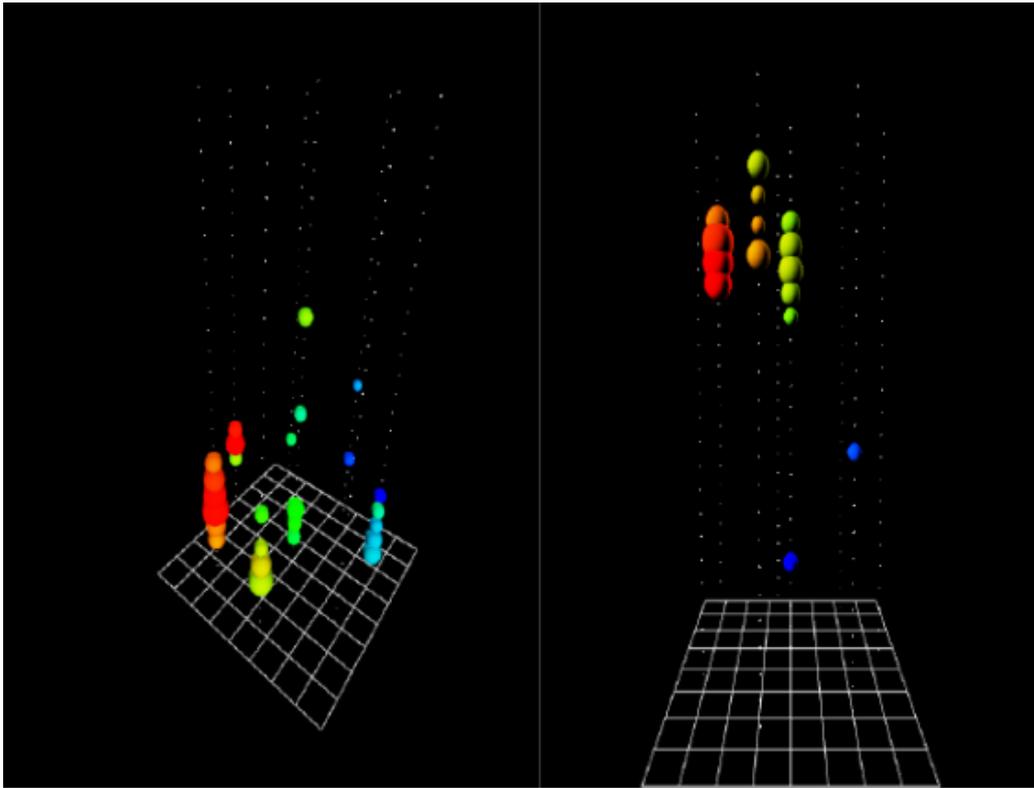


Рис.20. Восстановленные мюонные события Baikal-GVD. Восстановленные зенитные углы: 33° (слева) и 69° (справа)

В **Заключении** приводятся основные результаты работы:

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.

Список публикаций по теме диссертации

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)

Аврорин
Александр Дмитриевич
Регистрация мюонов на глубоководном
нейтринном телескопе BAIKAL-GVD

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,5 Зак. № 22400 Тираж 100 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел

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