

Айнутдинов
Владимир Маратович

Кластер Baikal-GVD —
основная структурная единица
Байкальского глубоководного
нейтринного телескопа

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

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

Официальные оппоненты:

Денисов Сергей Петрович, доктор физико-математических наук, академик Российской академии наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логанова» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», главный научный сотрудник.

Ольшевский Александр Григорьевич, доктор физико-математических наук, профессор, Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатории ядерных проблем, начальник отдела физики элементарных частиц.

Хренов Борис Аркадьевич, доктор физико-математических наук, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, отдел космических наук, лаборатория частиц сверхвысоких энергий, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН, г. Москва)

Защита состоится _____ в _____ часов на заседании диссертационного совета Д002.119.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте <http://www.inr.ru/rus/referat/dis-zasch.html>

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета Д002.119.01,
д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН

С. В. Троицкий

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

Актуальность

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

Идея регистрации элементарных частиц на крупномасштабных черенковских детекторах в естественных прозрачных средах была впервые высказана в начале 60-х годов прошлого века выдающимся советским ученым М.А.Марковым. По предложению академика

А.Е. Чудакова в СССР началась разработка метода глубоководного детектирования, ориентирующаяся на оз. Байкал как на полигон для испытаний и место развертывания будущих крупномасштабных нейтринных телескопов. В период с 1993 по 1998 гг. на Байкале был развернут первый в мире глубоководный нейтринный телескоп НТ200. Уже из набора экспериментальных данных 1994 года были выделены первые в мировой практике глубоководных и подледных экспериментов события от нейтрино.

Идея глубоководной регистрации в своей ледовой модификации, когда вместо естественного водоема фотодетекторы погружаются в прозрачный антарктический лед, привела к созданию на Южном полюсе нейтринного телескопа AMANDA и, на основе опыта его эксплуатации, детектора IceCube с инструментальным объемом $\sim 1 \text{ км}^3$. На установке IceCube в 2010–2013 гг. были впервые зарегистрированы «астрофизические» нейтрино, т.е. нейтрино, родившиеся за пределами солнечной системы. Результат, полученный в эксперименте IceCube, ответил на вопрос о величине потока нейтрино астрофизической природы и определил необходимый уровень чувствительности экспериментов при решении задач нейтринной астрофизики высоких энергий. Поскольку детекторы Северного полушария ANTARES и НТ200 не обладали необходимым уровнем чувствительности к нейтринному потоку, стала очевидной необходимость создания нейтринных телескопов на порядок большего объема с тем, чтобы вести исследование источников нейтрино высоких энергий по всей небесной сфере. К наиболее значимым проектам детекторов Северного полушария следует отнести Baikal-GVD (оз. Байкал) и KM3NeT (Средиземное море) в рамках которых к 2020 году планируется создание нейтринных телескопов масштаба кубического километра.

Для координации работ по созданию и проведению физических исследований на нейтринных телескопах в октябре 2013 года была создана новая научная структура: GNN (Global Neutrino Network) как первый этап в формировании консорциума Глобальная нейтринная обсерватория (GNO) с участием всех действующих в этой области международных коллабораций: ANTARES, Baikal, IceCube, KM3NeT. Развитие такого взаимодействия повысит уровень надежности и достоверности представляемых результатов, ускорит поиск необходимых технических решений, позволит вести поиск и изучение источников нейтрино высоких энергий на всей небесной сфере. Нейтринный

телескоп Baikal-GVD должен стать одной из ключевых установок будущей международной нейтринной обсерватории.

Цель работы, задачи и методы исследования

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

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Исследования подходов и методов регистрации нейтрино высоких энергий по черенковскому излучению продуктов их взаимодействия (мюонам и каскадным ливням) с целью определения физических и технических требований к регистрирующей системе детектора.
2. Разработка научно-технического проекта Байкальского глубоководного нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба.
3. Исследования и разработка фотодетектора черенковского излучения — оптического модуля, оптимизированного для использования в составе детектора Baikal-GVD и соответствующего требованиям, предъявляемым к нейтринным телескопам нового поколения, по уровню чувствительности, временному разрешению, функциональным возможностям и надежности.
4. Разработка концепции и оптимизация конфигурации регистрирующей системы Baikal-GVD с учетом характеристик водной среды оз. Байкал.
5. Разработка архитектуры системы сбора данных телескопа, обеспечивающей совместное эффективное функционирование ее основных элементов: триггерной системы, систем калибровки и мониторинга, электронных модулей обработки данных и передачи информации.

6. Создание функционально законченного комплекса аппаратуры и технических средств системы регистрации и сбора данных детектора, проведение лабораторных и натурных исследований аппаратуры с целью оценки ее надежности и корректности функционирования.
7. Разработка методики и организация подготовки и контроля электронных систем детектора в условиях их массового производства (~600 оптических модулей в год), обеспечивающей высокий уровень производительности работ, достижение требуемых технических характеристик, индивидуальную паспортизацию и необходимый уровень надежности аппаратуры.
8. Проведение полномасштабных долговременных испытаний системы регистрации и сбора данных нейтринного телескопа Baikal-GVD.
9. Экспериментальные исследования характеристик нейтринного телескопа и корректности его работы в режиме регистрации мюонов и каскадных ливней.

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

Можно выделить три основных этапа работ по созданию нейтринного телескопа в оз. Байкал. В течение 2006–2010 гг. были проведены исследования, связанные с разработкой базовых элементов и систем

телескопа Baikal-GVD, изготовлены опытные образцы регистрирующей аппаратуры и проведены их испытания в условиях совместной работой с детектором HT200+. Результатом этих исследований стало создание первой экспериментальной гирлянды оптических модулей и подготовка научно-технического проекта Байкальского глубоководного нейтринного телескопа.

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

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

Необходимо отметить, что научные исследования по совершенствованию системы сбора и обработки данных телескопа проводятся непрерывно и их результаты позволяют улучшать характеристики как вновь развертываемых кластеров, так и уже установленных заменой электронных блоков во время ежегодных регламентных работ по поддержанию работоспособности систем телескопа. В результате этих исследований были существенно расширены функциональные возможности глубоководных систем обработки данных, калибровки и мониторинга параметров аппаратуры, была существенно повышена пропускная способность линий передачи данных, уменьшено «мертвое время» при регистрации событий, повышена надежность работы телескопа и т.д. Возможность модернизации электронных систем ней-

тринного телескопа в сочетании с простотой изменения его конфигурации является одним из важных преимуществ Байкальского проекта, позволяющего адаптировать его к решению новых физических задач и продлевать срок эксплуатации детектора.

Научная новизна и практическая значимость

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

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

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

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

На защиту выносятся:

1. Результаты заверщенного цикла исследований, разработок и производства, реализованные в создании уникальной исследовательской установки на оз. Байкал, являющейся базой для создания глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD масштаба кубического километра.
2. Масштабируемая модульная архитектура системы регистрации и сбора данных нейтринного телескопа Baikal-GVD, которая обеспечивает эффективное развертывание установки со льда оз. Байкал, простоту ее наращиваемости и возможность адаптации для решения различных физических задач, а также проведение физических исследований уже на ранних стадиях развертывания установки.
3. Результаты оптимизации конфигурации детектора, триггерных условий регистрации, функционального состава и технических параметров измерительной аппаратуры, обеспечившие величину эффективного объема для регистрации каскадных ливней одним кластером нейтринного телескопа $\sim 0,05$ куб. км, и точность восстановления направления мюонных треков $\sim 0,5^\circ$.
4. Новый фотодетектор (оптический модуль) для нейтринного телескопа Baikal-GVD на базе ФЭУ R7081-100, оснащенный системами управления, калибровки и мониторинга его параметров и обеспечивающий эффективную регистрацию слабых черенковских вспышек, генерируемых релятивистскими заряженными частицами.
5. Комплекс физической аппаратуры, включающий в свой состав глубоководные модули и межмодульные коммуникации, обеспечивающие регистрацию сигналов, выработку триггера, формирование временных кадров событий, предварительную обработку и передачу информации в Береговой центр сбора данных, калибровку каналов установки, управление электропитанием всех узлов детектора.
6. Методика и аппаратные средства калибровки каналов установки без применения внешних источников света, обеспечивающие точность измерения временных задержек каналов на уровне ~ 2 нс и величину динамического диапазона каналов до $\sim 10^4$ ф.э.
7. Положительные результаты многолетних натурных испытаний аппаратуры нейтринного телескопа Baikal-GVD, продемонстрировавшие работоспособность и устойчивость системы регистрации и сбора данных установки и надежность работы измерительных каналов на уровне 10^{-2} отказов в год.

8. Результаты работ по вводу в эксплуатацию в режиме постоянной экспозиции первых двух кластеров телескопа Baikal-GVD с суммарным эффективным объемом 0,1 куб. км, представляющие собой на настоящий момент времени один из крупнейших нейтринных телескопов Северного полушария.

Личный вклад автора

- Автор принимал участие в экспериментальных исследованиях, обработке и анализе данных, полученных на нейтринном телескопе НТ200. Им получен предел на поток нейтрино, сопровождающих гамма-всплески.
- Автор принимал участие в разработке и создании системы сбора данных нейтринного телескопа НТ200+.
- Автор разработал общую концепцию и принцип построения системы регистрации и сбора данных установки Baikal-GVD.
- Автор осуществлял руководство исследованиями, разработкой и созданием основных электронных систем нейтринного телескопа: оптического модуля, измерительного канала на базе наносекундных АЦП, аппаратуры для управления работой, контроля и калибровки детектора.
- Автором были разработаны методы временной и амплитудной калибровки каналов установки и принципы построения системы формирования триггера.
- С 2007 года автор руководит работами по изготовлению, наладке и тестированию аппаратуры Baikal-GVD.
- Автор участвовал в экспериментах на озере Байкал с 2004 года. С 2007 года руководил работами по наладке и натурным испытаниям глубоководных установок во время экспедиций на оз. Байкал.
- Осуществлял научное руководство исследованиями и подготовкой к защите диссертаций на степень магистра двух выпускников МФТИ и трех диссертаций на степень кандидата физико-математических наук сотрудников ИЯИ РАН, результаты которых использованы в данной работе.

Апробация работы и публикации

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

1. Международная конференция по космическим лучам (Interna-

tional Cosmic Ray Conference — ICRC): Пекин–2011, Рио-де-Жанейро–2013, Гаага–2015, Пусан–2017.

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

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

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, списка рисунков и списка таблиц. Основные выводы диссертации приведены в заключении. Объем диссертации: 217 стр., 106 рисунков, 11 таблиц, 110 наименования цитируемой литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во Введении обосновывается актуальность создания детектора нейтрино высоких энергий в оз. Байкал: глубоководного нейтринного телескопа нового поколения Baikal-GVD, формулируются цели и задачи исследования, обсуждается практическая значимость и научная новизна полученных результатов.

В Главе 1 обсуждается состояние и перспективы развития крупномасштабных детекторов черенковского излучения в естественных средах (нейтринных телескопов), ставших в последние десятилетия основными инструментами исследования природных потоков нейтрино высоких энергий. В основе этих исследований лежит метод регистрации черенковского излучения вторичных мюонов либо электромагнитных или адронных ливней, образующихся в нейтринных взаимодействиях, набором фотодетекторов, размещенных на достаточно больших расстояниях: от десятков до сотен метров друг от друга.

Методика глубоководного детектирования элементарных частиц была разработана в конце прошлого века. Нейтринные телескопы первого поколения были созданы последовательно на оз. Байкал (NT200 — 1998 год), в Антарктиде на Южном полюсе (AMANDA — 2000 год) и в Средиземном море (ANTARES — 2008 год). Успешная эксплуатация этих детекторов инициировала создание нейтринных телескопов второго поколения, с размерами масштаба кубического километра. К наиболее значимым из введенных в эксплуатацию и проектируемых в настоящее время нейтринных телескопов следует отнести IceCube, KM3NeT и Baikal-GVD, которые находятся на разных стадиях разработки и реализации. Конфигурация, архитектура измерительных и коммуникационных систем, а также потенциальные возможности при решении конкретных задач каждого из этих детекторов обусловлены их местоположением, свойствами среды, степенью сложности инженерно-технических решений при создании и эксплуатации установки, затратами на создание и поддержку инфраструктуры, а также возможностью модификации конфигурации и увеличения светосилы телескопа.

На детекторе IceCube в 2010–2013 гг. были впервые зарегистрированы “астрофизические” нейтрино высоких энергий, т.е. нейтрино, родившиеся за пределами солнечной системы. Результат, полученный в эксперименте IceCube, является важнейшей вехой в развитии исследований природных потоков нейтрино высоких энергий, так как

он отвечает на вопрос о величине потока нейтрино астрофизической природы и определяет необходимый уровень чувствительности экспериментов при решении задач нейтринной астрофизики высоких энергий. Регистрация “астрофизических” нейтрино, ознаменовавшая рождение нейтринной астрономии, поставило на повестку дня необходимость создания в Северном полушарии нейтринного телескопа близкого к IceCube масштаба с тем, чтобы вести исследование источников нейтрино высоких энергий по всей небесной сфере. Потребность по крайней мере в двух телескопах расположенных в Южном и Северном полушариях обусловлена их ограниченной угловой апертурой, зависящей от энергии нейтрино. Следует отметить также важное преимущество детекторов, расположенных в Северном полушарии – они способны вести практически непрерывное наблюдение центра Галактики (Baikal-GVD—18 часов и KM3NeT—15 часов в течение суток) и Галактической Плоскости, где сконцентрирована основная часть потенциальных галактических источников космических лучей. Байкальский нейтринный телескоп Baikal-GVD, средиземноморский KM3NeT и детектор IceCube в силу их географического положения будут взаимно дополнять друг друга и сформируют мировую сеть установок, нацеленных на поиск и исследование источников нейтрино высоких и сверхвысоких энергий.

В Главе 2 представлены основные этапы и результаты исследований, направленных на разработку и создание нейтринного телескопа в оз. Байкал, общая концепция детектора Baikal-GVD и конфигурация его регистрирующей системы. Общая концепция Baikal-GVD была разработана на основании опыта, накопленного при создании и эксплуатации установки HT200 (HT200+). Возможность проведения натурных испытаний новой регистрирующей аппаратуры Baikal-GVD на действующей установке, используя инфраструктуру Байкальской нейтринной обсерватории (БНО), явилась ключевым фактором, позволившим в сжатые сроки (2006–2010 годы) разработать базовые элементы будущего нейтринного телескопа.

БНО расположена в южной части оз. Байкал (51°50' С.Ш., 104°20' В.Д.). Глубина оз. Байкал в этом районе составляет 1300–1360 метров на расстояниях более трех километров от берега. Наличие с середины февраля до середины апреля устойчивого ледового покрова позволяет вести работы по развешиванию телескопа, а также ремонтные, профилактические и исследовательские работы непосредственно со льда,

используя его как монтажную платформу. Полномасштабные эксперименты на Байкальском телескопе были начаты в 1998 году, когда был создан детектор НТ200. На нем было получено одно из самых сильных на тот момент времени ограничений на диффузный поток нейтрино, проведены исследования атмосферных мюонных нейтрино, установлены пределы на потоки WIMP от Земли и Солнца, медленных и релятивистских магнитных монополей, нейтрино от гамма-всплесков.

В 2005 году НТ200 был модернизирован с целью увеличения его эффективного объема. Нейтринный телескоп НТ200+ (см. рис. 1) состоит из центральной части (НТ200) и трех внешних гирлянд (НТ+), расположенных на расстоянии 100м от центральной части детектора. Создание детектора НТ200+ потребовало существенной модификации системы сбора данных установки. Были решены проблемы, связанные с увеличением временного диапазона работы измерительных каналов, с синхронизацией работы внешних гирлянд и с быстродействием систем передачи данных. С точки зрения решения этих принципиальных задач детектор НТ200+ стал первым шагом к созданию телескопа кубокилометрового масштаба: Baikal-GVD.

Деятельность, связанная с исследованием и созданием новых элементов регистрирующей системы Baikal-GVD, была начата с разработки нового фотодетектора: оптического модуля (ОМ). Основными требованиями к фотоприемнику ОМ являлись хорошее временное разрешение (~ 3 нс) и максимальная чувствительность к черенковскому излучению, которая определяется площадью фотокатода и его квантовой эффективностью. В 2007 году были разработаны и исследованы первые версии ОМ на основе ФЭУ R8055 (фотокатод $\varnothing 13''$) и XP1807 (фотокатод $\varnothing 12''$). Другим направлением работ по созданию аппаратуры Baikal-GVD было исследование возможностей использования в новом детекторе регистрирующей системы на основе аналого-цифровых преобразователей (АЦП), измеряющих форму импульсов сигналов ФЭУ. Во время экспедиции 2007 года на внешней гирлянде НТ200+ были размещены два ОМ, оснащенные системой обработки сигналов на основе промышленных АЦП с частотой дискретизации 250 МГц. На этом прототипе измерительных каналов были зарегистрированы первые события, содержащие полную информацию о форме регистрируемых импульсов. В 2007 году был разработан также первый вариант конструкции гирлянды оптических модулей, и в 2008 году была установлена экспериментальная гирлян-

да из 6 ОМ. В 2009 году количество оптических модулей было увеличено до 12.

Помимо оптических модулей в состав гирлянды входило два глубоководных модуля управления: центральный модуль (ЦМ) и сервисный модуль (СМ). ЦМ выполнял функции сбора данных и управления работами двенадцати ОМ. В нем были размещены три платы 4-х канальных АЦП с частотой дискретизации 200 МГц. В СМ были

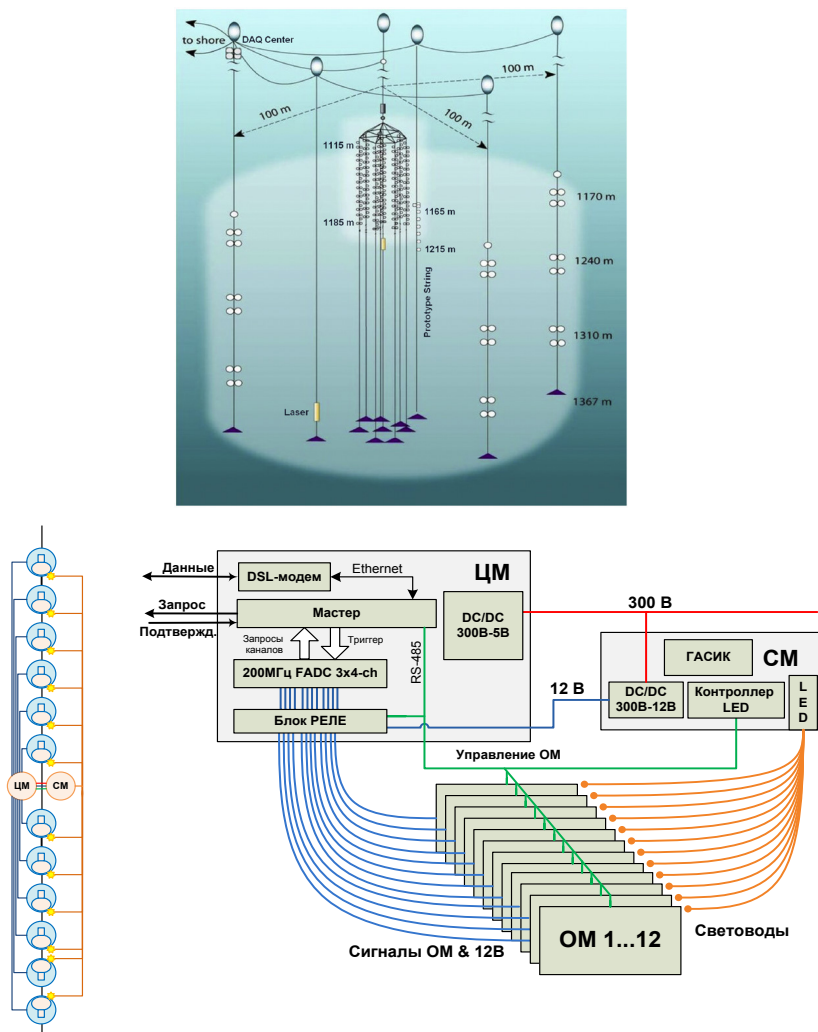


Рис. 1. Детектор HT200+ и экспериментальная гирлянда Baikal-GVD

расположены элементы системы мониторинга и калибровки, а также гидроакустическая система измерения координат глубоководной аппаратуры (ГАСИК). На базе экспериментальной гирлянды в период 2008–2010 годов проводились исследования и доработка базовых элементов Baikal-GVD: оптического модуля, блоков АЦП, аппаратуры системы управления и передачи данных. В 2009 году, в связи с окончанием производства ФЭУ Photonis XP1807, в качестве фотодетектора был успешно применен ФЭУ R7081-HQE (R7081-100) с фотокатодом диаметром 10" и квантовой эффективностью $\sim 35\%$. Экспериментальные исследования характеристик каналов на основе АЦП с частотой дискретизации 200 МГц показали, что их временное разрешение составляет 1,5–2 нс, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к системе регистрации детектора. Был разработан новый метод калибровки каналов, основанный на измерении задержек сигналов ФЭУ, точность которого составила ~ 2 нс. Полученный результат позволил отказаться от метода калибровки, используемого в установке НТ200 (калибровочные сигналы от внешнего светового источника подавались по световодам на оптические модули гирлянды), техническая реализация которого требовала значительных временных затрат во время монтажных работ на льду озера. Для оценки эффективности подавления шумовых срабатываний каналов и проверки корректности процедуры реконструкции событий было восстановлено зенитное угловое распределение атмосферных мюонов, зарегистрированных гирляндой (набор данных 2010 года), и получено хорошее согласие между моделью и экспериментом.

В результате исследований, проведенных на экспериментальной гирлянде, были разработаны концепция и базовая конфигурация детектора, которые стали основой для дальнейших экспериментальных и расчетных работ в рамках подготовки научно-технического проекта и поэтапного создания глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD. В соответствии с этой концепцией основными структурными элементами телескопа являются оптические модули, секции ОМ, гирлянды и кластеры гирлянд. В состав секции входит 12 ОМ с аналоговыми выходами. Аналоговые сигналы со всех ОМ секции передаются в ЦМ по глубоководным кабелям. В ЦМ осуществляется преобразование аналоговых сигналов в цифровой код (измерение формы импульса) и формирование локального триггера секции. Триггерным условием является совпадение сигналов от двух соседних оптических

модулей с «низким» и «высоким» порогами: ~ 1 и ~ 3 фотоэлектронов соответственно. Оптические модули секций монтируются на грузонесущие кабели, формируя гирлянды (от 2 до 4 секций на гирлянде), которые в свою очередь группируются в кластеры (8 гирлянд на кластер). Центры сбора данных кластеров располагаются вблизи поверхности озера и соединены с береговым центром сбора данных гибридными электрооптическими кабелями.

Временной график развертывания нейтринного телескопа включает два этапа. На первом этапе (до 2020 года) планируется развернуть в озере Байкал установку с характерными размерами $\sim 0,5$ км³, содержащую $\sim 2 \times 10^3$ оптических модулей (GVD-1). Дальнейшее развитие детектора предполагает его наращивание до масштабов $\sim 10^4$ оптических модулей. Выбор оптимальной конфигурации, а также оценка светосилы и разрешающей способности GVD-1 были основаны на результатах моделирования отклика телескопа на черенковское излучение мюонов и ливней. Исходя из результатов анализа зависимости эффективного объема для регистрации ливней и эффективной площади для регистрации мюонов от значений геометрических параметров телескопа в качестве оптимальной была выбрана конфигурация, для которой расстояния между оптическими модулями на гирляндах составляет 15 метров, радиус кластеров 60 метров, а расстояния между кластерами 300 метров. Данная конфигурация включает в свой состав 2304 оптических модуля, сгруппированных в 12 кластеров, и обеспечивает эффективный объем для регистрации ливней $0,2-0,7$ км³ в интервале энергий 10^5-10^7 ГэВ, и эффективную площадь для регистрации мюонов $0,2-0,5$ км² в диапазоне энергий 10^4-10^6 ГэВ. Для этой конфигурации GVD-1 была рассчитана точность восстановления направления движения мюонов и каскадных ливней. Ожидаемое медианное значение углового разрешения телескопа для мюонов меньше $0,5^\circ$ и слабо зависит от энергии. Точность восстановления направления ливня растет с увеличением энергии и составляет величину около 5 градусов (медианное значение) при усреднении углового разрешения телескопа по спектру E^{-2} .

На основании проведенных экспериментальных исследований характеристик регистрирующей аппаратуры и модельных расчетов был подготовлен «Научно-технический проект глубоководного нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба на оз. Байкал».

В Главе 3 представлено описание оптического модуля, который является основным элементом регистрирующей системы нейтринного телескопа Baikal-GVD. Оптические модули составляют около 90% от всех глубоководных модулей установки и объем работ, связанных с подготовкой ОМ для детектора и последующим их монтажом в оз. Байкал, определяет время развертывания телескопа. Поэтому, кроме физических характеристик оптических модулей, с точки зрения подготовки и монтажа ОМ принципиальное значение имеют их конструкция и функциональный состав электроники. Оптический модуль Baikal-GVD состоит из глубоководного стеклянного корпуса, фотоэлектронного умножителя и блока электроники (см. рис. 2).

ФЭУ R7081-100 (фотокатод $\varnothing 10''$, квантовая эффективность $\sim 35\%$) размещается в 17-дюймовом глубоководном корпусе VITROVEX. Ха-

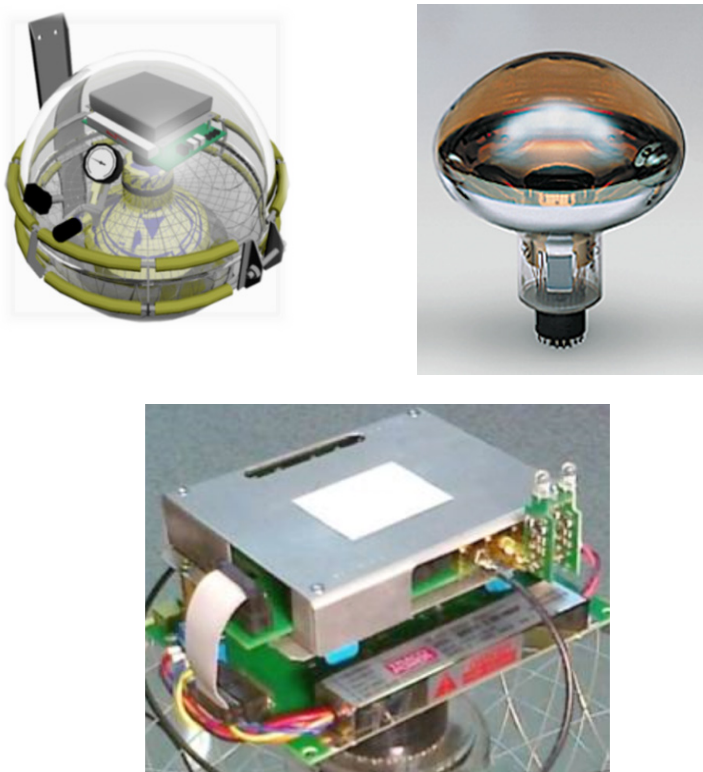


Рис. 2. Общий вид оптического модуля, фотографии ФЭУ и блока электроники

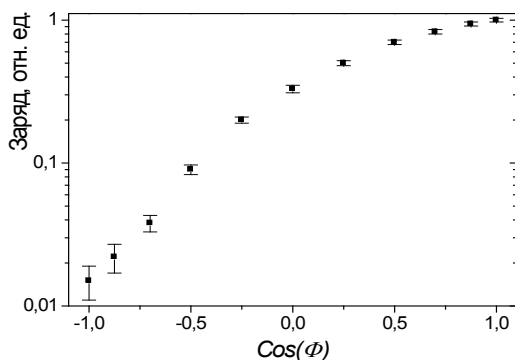
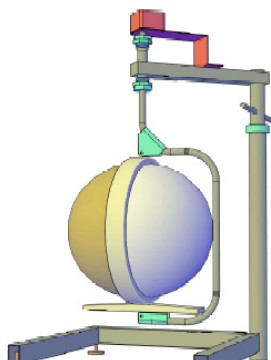


Рис. 3. Стенд для исследований угловых характеристик ОМ и зависимость отклика оптического модуля от угла падения света относительно оси ФЭУ

характеристики ФЭУ удовлетворяют основным требованиям, предъявляемым к фотодетекторам нейтринных телескопов: разброс времен пролета фотоэлектронов составляет $\sim 3,5$ нс, отношение пик-долина для однофотоэлектронного спектра ~ 3 , величина высоковольтного напряжения, обеспечивающего усиление 10^7 , составляет 1200–1800 В, скорость счета шумовых импульсов 5–10 кГц. Блок электроники оптического модуля монтируется на цоколь ФЭУ. В его состав входят источник высоковольтного напряжения, плата ФЭУ, содержащая пассивный делитель напряжений (18 МОм) и усилитель сигналов, контроллер и калибровочные светодиоды. Источник высоковольтного напряжения PHV12-2.0K2500P обеспечивает электропитание делителя ФЭУ напряжением положительной полярности. Длительность переднего фронта сигналов усилителя оптимизирована для работы с АЦП с частотой дискретизации 200 МГц и составляет величину ~ 10 нс. Калибровочная система ОМ реализована на основе двух синих светодиодных источников (длительность сигналов 5–6 нс, диапазон регулировки интенсивности от 1 до 10^8 фотонов) и генератора сигналов, имитирующих импульсы ФЭУ (тестовые импульсы). Управление работой аппаратуры оптических модулей осуществляется при помощи специализированного контроллера (контроллер ОМ). Энергопотребление оптического модуля зависит от величины высоковольтного напряжения ФЭУ и составляет величину 2,3–2,9 Вт в диапазоне напряжений от 1000 до 2000 В.

Принципиальное значение для математического моделирования работы телескопа и последующего сопоставления экспериментальной

информации с расчетными данными имеет угловая зависимость отклика ОМ. На рис. 3 представлены результаты измерения зависимости отклика ОМ от угла падения света относительно оси ФЭУ и созданное для этих целей стендовое оборудование.

Программа исследований ОМ включала в себя как измерение параметров отдельных компонент, так и исследования характеристик измерительных каналов ОМ в целом. Для проведения исследований был создан набор лабораторных стендов. Помимо исследований ОМ, стендовое оборудование использовалось для их паспортизации в процессе массового производства. Процедура измерения характеристик и паспортизации ОМ была полностью автоматизирована. Автоматизированный стенд был организован на базе осциллографа НДО 4034 с встроенным компьютером, работающим под управлением операционной системы семейства Windows. Выходы оптических модулей подключались к входам осциллографа через глубоководные 90-метровые кабели, применяемые в телескопе. Продолжительность измерений характеристик одного ОМ составляла 3 часа. На первом этапе подбиралось напряжение на делителе, соответствующее штатному усилению ОМ ($K_{yc} = 10^8$) и измерялись временные и амплитудные характеристики оптического модуля в однофотозлектронном (о.ф.э.) режиме работы ФЭУ. Выборочные результаты измерений показаны на рис. 4.

На втором этапе проводилась амплитудная и временная градуировка каналов. В качестве параметра зарядовой градуировочной кривой использовалась переменная $S = Q / (N_{фэ} \times Q_{фэ})$, где Q — измеренный заряд импульса, $Q_{фэ}$ — заряд о.ф.э. импульса, $N_{фэ}$ — количество фотоэлектронов (ф.э.) в импульсе. Формирование сигналов с заданным количеством фотоэлектронов осуществлялось сложением световых импульсов от двух светодиодов при различных комбинациях яркости их вспышек. Зависимость параметра S от количества ф.э. (зарядовая градуировочная кривая) представлена на рис. 5 для партии из ~100 ОМ. Измерение градуировочных кривых индивидуальных каналов позволяет оценивать количество ф.э. в импульсе по измеренному заряду с точностью ~20% в нелинейной области работы каналов (до ~ 10^4 ф.э.). Время-амплитудная зависимость откликов каналов характеризовалась отклонением измеренного времени регистрации сигнала от ожидаемого значения, полученного на основании информации о времени формирования импульса светодиода (параметр Δt). Пример зависимости Δt от количества ф.э. и распределение ОМ по граничному значению количе-

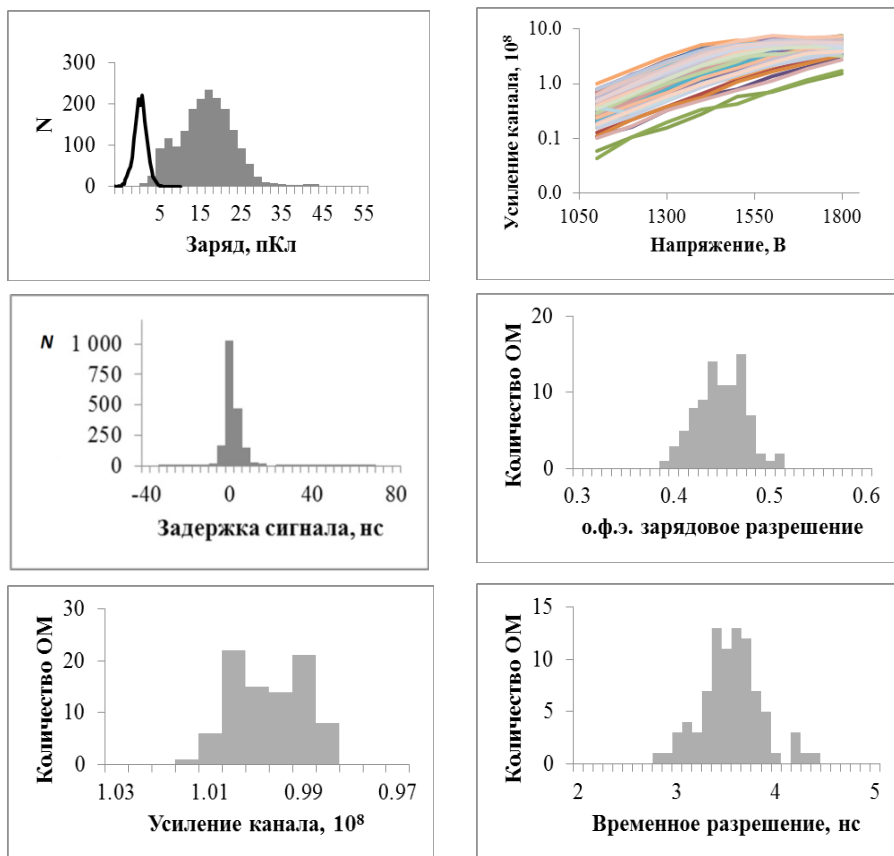


Рис. 4. Верхний ряд: характерное о.ф.э. зарядовое распределение ($K_{\text{ус}} = 10^8$) и распределение пьедестала (слева), зависимости $K_{\text{ус}}$ от напряжения на ФЭУ (в центре), распределение по задержкам сигналов ФЭУ в о.ф.э. режиме (справа). Нижний ряд: распределения ОМ по величине зарядового разрешения (слева), по величине подобранный коэффициент усиления (в центре), по величине временного разрешения (справа)

ства ф.э., для которого $\Delta t < 1$ нс, представлены на рис.5. В диапазоне линейности канала ($\sim 10^2$ ф.э.) Δt не превышает 1 нс.

На третьем этапе исследований проводились измерения параметров послеимпульсов ОМ. Послеимпульсы являются основным источником высоко-амплитудной (многоэлектронной) компоненты шумов ФЭУ и определяют величину фактора подавления шумовых сигналов порогом регистрации. В качестве характеристики послеимпульсов использовался параметр $R = N_{\text{фэ}}^{\text{послеимп}} / N_{\text{фэ}}^{\text{имп}} \times 100\%$. Характерная

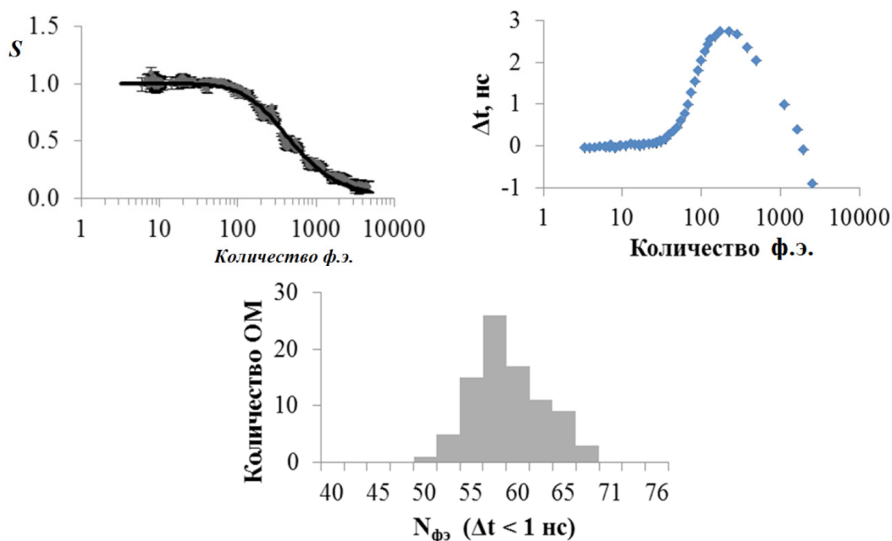


Рис. 5. Усредненная зарядовая градуировочная кривая каналов (слева), пример зависимости параметра Δt от $N_{фэ}$ (в центре) и распределение ОМ по граничному значению $N_{фэ}$ для которого $\Delta t < 1$ нс

зависимость параметра R от времени после регистрации основного импульса представлена на рис.6. На этом же рисунке показано распределение ОМ по суммарному заряду послеимпульсов. Доля послеимпульсов для большей части ОМ составляет 10–15%.

Разработанное стендовое оборудование было использовано в составе технологической линии для массовой подготовки оптических модулей. Первый вариант технологической линии был создан в ИЯИ РАН. На ней были подготовлены ОМ для первого кластера Baikal-GVD. В 2016 году аналогичная технологическая линия была внедрена в ОИЯИ (г. Дубна).

В общей сложности около 600 оптических модулей было подготовлено и установлено в составе первых двух кластеров Baikal-GVD. Простота конструкции ОМ, достаточно тщательная проработка процедуры их сборки и полная автоматизация тестирования и паспортизации позволили добиться подготовки до 8 ОМ в день. На рис.7 представлена общая схема подготовки оптических модулей, на которой отражены все тестовые процедуры, начиная с испытаний компонент ОМ, и заканчивая тестированием оптического модуля после его монтажа на гирлянду в оз. Байкал.

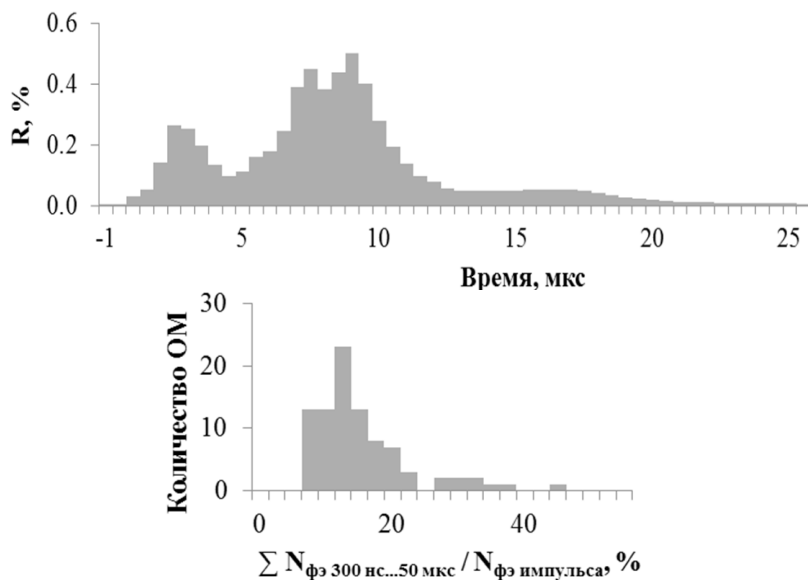


Рис. 6. Зависимость доли заряда послеимпульсов R от времени (слева) и распределение ОМ по суммарному заряду послеимпульсов (справа)

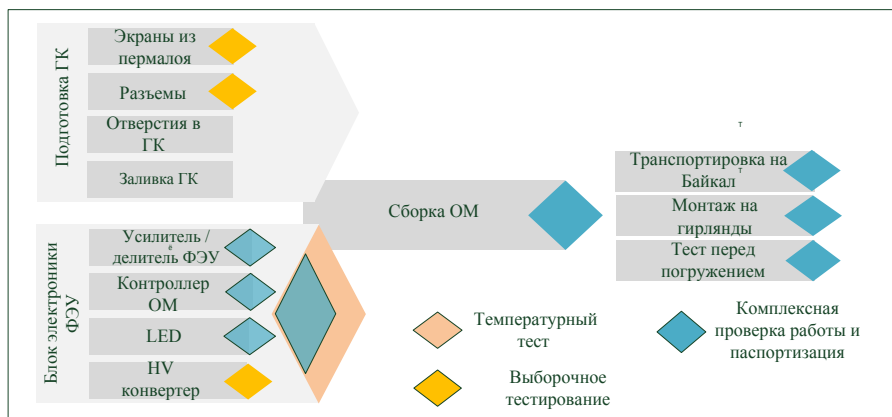


Рис. 7. Схема подготовки оптических модулей для Baikal-GVD

В главе 4 представлены описание и основные характеристики системы сбора данных (ССД) Baikal-GVD. Основными функциями системы сбора данных являются преобразование аналоговых сигналов ОМ в цифровой код, выработка триггера, формирование временных кадров событий и их передача в Береговой центр. ССД также обеспе-

чивает управление режимами работы аппаратуры и системой электропитания детектора и осуществляет контроль корректности работы всех его элементов.

Аппаратуру системы сбора данных можно разделить на два класса: электроника, специально разработанная для Baikal-GVD, и коммерческая (промышленная) аппаратура. Ключевым элементом ССД являются блок *сбора данных и амплитудного анализа секции* (БСД-12), разработанный для Baikal-GVD на базе сдвоенных микросхем АЦП AD9613 и ПЛИС «XILINX Spartan 6». На плате БСД-12 реализовано 12 каналов аналого-цифровых преобразователей (частота 200 МГц, временное окно для измерения до 30 мкс). Для связи с модулем БСД-12 используется канал Ethernet (100 Мбит). Управление электропитанием и режимами работы ОМ осуществляется по каналу RS-485 через специализированную 12-канальную *плату управления оптическими модулями*. Для формирования и передачи по длинной линии (до 1 км) триггерных сигналов (*запрос и подтверждение*) в сети синхронизации телескопа используются специализированные *платы триггерной логики*.

В то время как специализированная аппаратура установки главным образом решает задачи сбора и преобразования данных, коммерческая электроника обеспечивает передачу данных и обмен информацией между различными системами телескопа. ССД детектора организована на основе двух типов каналов обмена данными: быстрого канала, в котором используются технологии Ethernet, и медленного канала, реализованного на основе интерфейса RS-485. Коммерческая электроника реализует функции коммутации и “удлинения” каналов Ethernet, и обеспечивает преобразование интерфейсов. Основная часть коммерческой аппаратуры для Baikal-GVD поставляется компанией МОХА. Время наработки на отказ оборудования этой фирмы превышает 10^6 часов.

Основными структурными элементами система сбора данных телескопа являются *измерительный канал, секция* оптических модулей, *гирлянда* и *кластер гирлянд*. Измерительный канал установки включает в свой состав фотодетектор, усилитель сигналов, коаксиальный кабель по которому передаются импульсы от ОМ (длина 90 м), АЦП и логику управления, реализованную на основе ПЛИС платы БСД-12 (см. рис. 8).

Канал выполняет функции измерения формы импульса, формирование временного кадра канала, выработки сигнала запрос и фор-

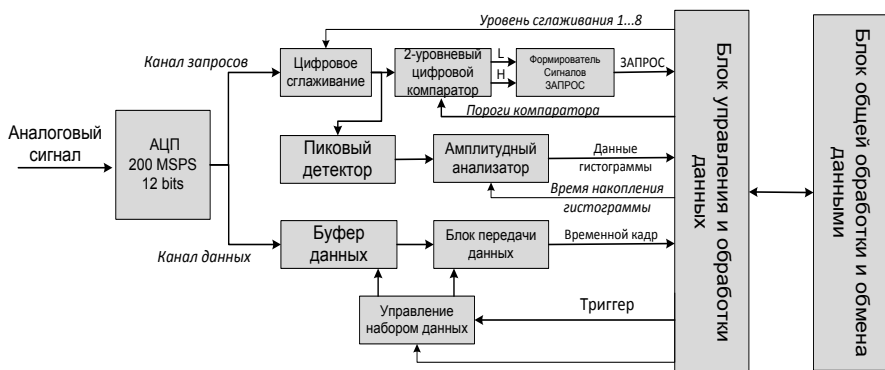


Рис. 8. Функциональная схема измерительного канала

мирование мониторинговых амплитудных гистограмм. Блок формирования сигнала запрос состоит из 2-уровневого цифрового компаратора, сравнивающего входной сигнал с программно-предустановленными порогами (т. н. низкий и высокий пороги — L и H соответственно), и формирователя. Мониторные гистограммы (разрешение 10 бит) предназначены для оперативного контроля работы каналов. Они формируются амплитудным анализатором, в состав которого входит пиковый детектор.

Двенадцать оптических модулей детектора сгруппированы в секции. Схема секции и фотография модуля управления секцией (центрального модуля — ЦМ) представлены на рис. 9. Триггерная логика секции реализована на базе ПЛИС, входящей в состав платы БСД-12. Основным элементом триггерной логики является *анализатор запросов*, на вход которого поступают *запросы каналов L и H* . Анализатор запросов реализован как *матрица совпадений запросов L и H* ($12L \times 12H$). *Запрос секции* поступает на счетчик запросов и передается в центр сбора данных кластера, где формируется общий триггер (сигнал *подтверждение*), который останавливает работу АЦП и инициирует чтение данных. Данные АЦП объединяются в составе *мастерных записей*, которые помимо временных кадров всех 12 каналов содержат время регистрации сигнала *стоп АЦП* и состояние счетчиков *запросов и подтверждений* (информация, необходимая для объединения *мастерных записей* разных секций в одно событие).

Мастерные записи секций передаются в центр сбора данных кластера через shDSL-модемы («удлинители» Ethernet) со скоростью

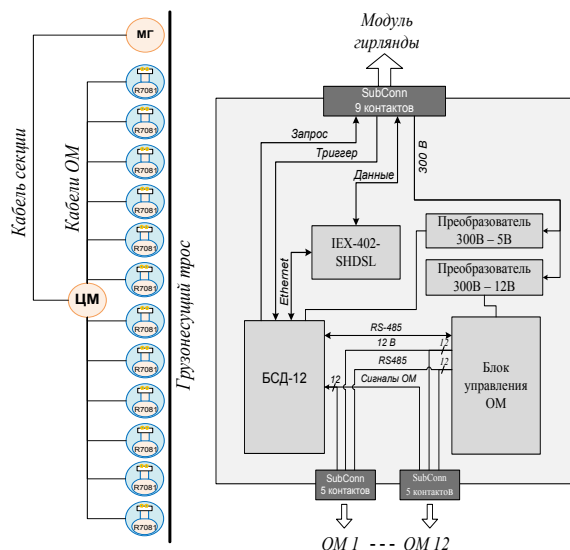


Рис. 9. Размещение ОМ в секции, функциональная схема секции и фотография модуля управления секцией — ЦМ

~ 6 М бит/сек. Для обеспечения необходимой пропускной способности осуществляется преобразование *мастерных записей*, из них выделяются области, в которых показания АЦП превышают пьедестал на величину ~0,3 о.ф.э. импульса. Алгоритм выделения сигналов реализован на аппаратном уровне. Средний размер преобразованной мастерной записи секции в режиме экспозиции составляет величину

~300 байт. С учетом пропускной способности shDSL-модемов надежная передача данных возможна при частоте триггера до ~2 кГц, что позволяет устанавливать пороги регистрации каналов на однофотозлектронном уровне.

Функции интерфейса, связывающего секции ОМ с центром сбора данных кластера, выполняет коммутационный модуль гирлянды (МГ). Он обеспечивает прием и передачу данных от секций, синхронизацию их работы и управление электропитанием. К модулю гирлянды также подключаются четыре акустических модема (АМ) системы позиционирования установки. Восемь гирлянд детектора сгруппированы в кластер. Центр сбора данных кластера располагается вблизи поверхности воды на глубине ~25 м. В его состав входят 4 электронных модуля, размещенных в глубоководных корпусах: *модуль данных, триггерный модуль, модуль электропитания и опто-электрическая подводная муфта (оптический наконечник)* — см. рис. 10. Центр кластера соединяется с Береговым центром сбора данных электрооптическим кабелем длиной ~6 км (*береговой кабель*). Подключение кабеля к модулям центра кластера осуществляется через оптический наконачник, в котором предусмотрена защита линий данных и электропитания от грозовых разрядов и “скачков” напряжения.

Электропитание кластера осуществляется от берегового источника питания (БИП) с выходным напряжением до 500В, которое подается на

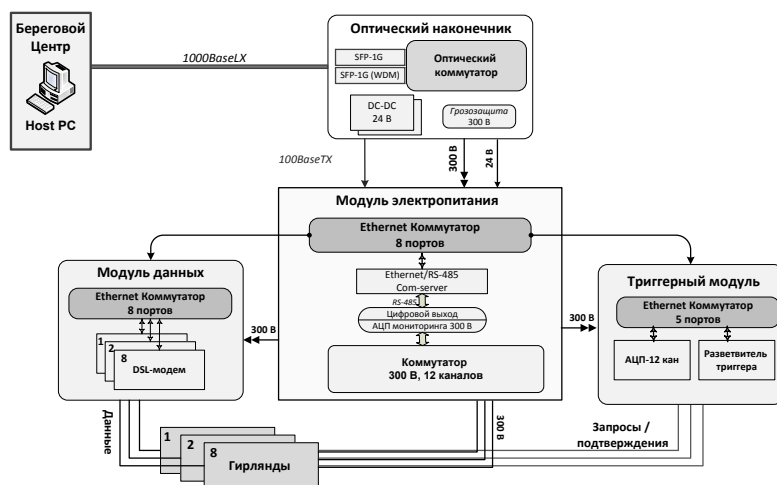


Рис. 10. Функциональная схема электроники центра сбора данных кластера

аппаратуру кластера через *береговой кабель*. Выходное напряжения БИП автоматически настраивается так, что бы на выходе кабеля его значение составляло 300В. Система электропитания разделена на два уровня. Первый уровень включает в себя управляемый 12 канальный коммутатор электропитания гирлянд, который размещен в *центре кластера*. Коммутаторы второго уровня, предназначенные для включения электропитания секций, установлены в каждом модуле гирлянды. Такая организация электропитания обеспечивает устойчивую работу системы в целом при выходе из строя отдельных элементов телескопа (в частности, короткого замыкания в результате нарушения герметизации глубоководных модулей или кабельных коммуникаций).

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

В Главе 5 представлены результаты натурных исследований работы нейтринного телескопа Baikal-GVD. Программа исследований включала в себя проверку корректности функционирования основных элементов и систем телескопа в режиме долговременной экспозиции, оценку их стабильности и надежности, анализ качества экспериментального материала, полученного на установке в различных режимах ее работы. В период 2012–2014 гг. в оз. Байкал были последовательно размещены пять гирлянд, которые вошли в состав первого кластера Baikal-GVD «Дубна», монтаж которого был закончен в апреле 2015 года (см. рис. 11). Первый кластер состоял из восьми гирлянд по 24 ОМ каждая, расположенных на расстоянии 40 м друг от друга. В течение года работы на первом кластере было проведено 622 серии измерений. Живое время экспозиции составило 213 дней. За время измерения было зарегистрировано $1,8 \times 10^9$ событий.

Опыт развертывания и эксплуатации первого кластера показал принципиальную возможность увеличения инструментальной длины составляющих его гирлянд. Увеличение трудоемкости монтажа за счет увеличения длины глубоководных кабельных коммуникаций компенсируется экономией времени на подготовку несущих кон-

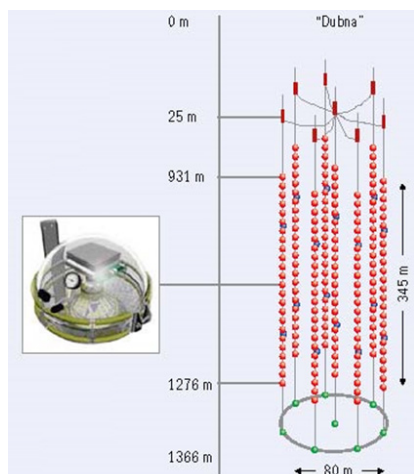
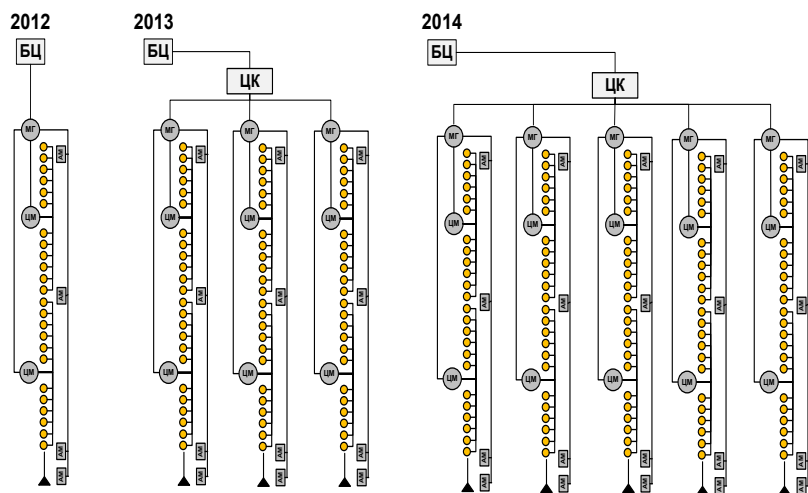


Рис. 11. Конфигурации установки с 2012 по 2014 г и кластер «Дубна»(2015) структурей телескопа и прокладку кабельных коммуникаций. Эксперимент по увеличению длин гирлянд был успешно проведен во время экспедиции на оз. Байкал 2016 года. На все гирлянды кластера были установлены дополнительные секции по 12 оптических модулей каждая.

Кластер в новой конфигурации (см. рис.12) успешно эксплуатируется с апреля 2016 года. В его состав входит восемь гирлянд длиной 525 м. Радиус кластера 60м, эффективный объем для ливней с

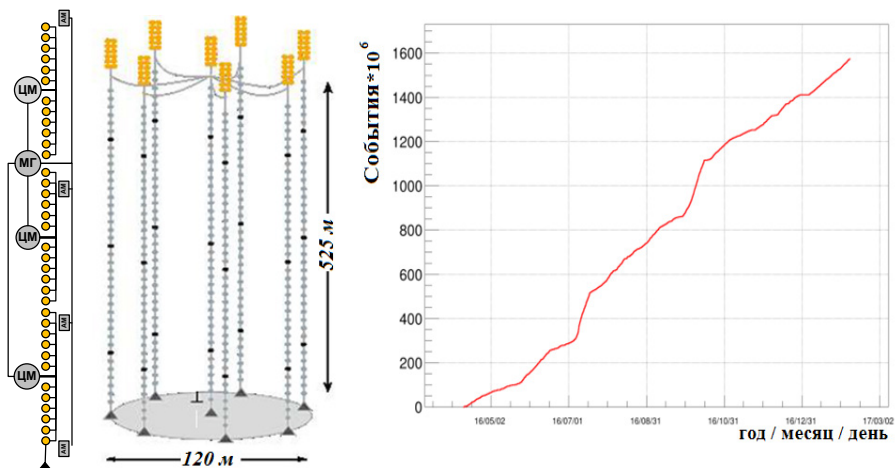


Рис. 12. Общий вид гирлянды с тремя секциями (слева), конфигурация кластера 2016 (в центре) и статистика набора экспериментальных данных в 2016 г.

энергиями $> 10^2 \text{ ТэВ} \sim 0,05 \text{ км}^3$. Общий объем набранной статистики в 2016 году составил $1,5 \times 10^9$ событий при живом времени экспозиции 235 дней.

Позитивный опыт развертывания кластера с гирляндами из трех секций позволил оптимизировать конфигурацию первой очереди установки (GVD-1). При сохранении общего числа оптических модулей (2304 ОМ) и эффективного объема установки, количество кластеров было уменьшено с двенадцати (24 ОМ в гирлянде) до восьми (36 ОМ в гирлянде). Во время экспедиции 2017 года был введен в эксплуатацию второй кластер Baikal-GVD. На рис. 13 представлена планируемая конфигурация GVD-1 и схема размещения первых двух кластеров. Каждый кластер состоит из 8 гирлянд (S_1-S_8) и центров управления, связанных с береговым центром гибридными оптоэлектрическими кабелями. На отдельной станции (лазерная гирлянда) установлена вспомогательная аппаратура, предназначенная для калибровки и временной синхронизации кластеров: лазерный и светодиодный источники. Суммарный эффективный объем установки для регистрации ливней в 2017 году составил $\sim 0,1 \text{ км}^3$. В таблице 1 представлена статистика работы двух кластеров с 13 апреля 2017 года (ввод установки в эксплуатацию) по 15 июня 2017 года.

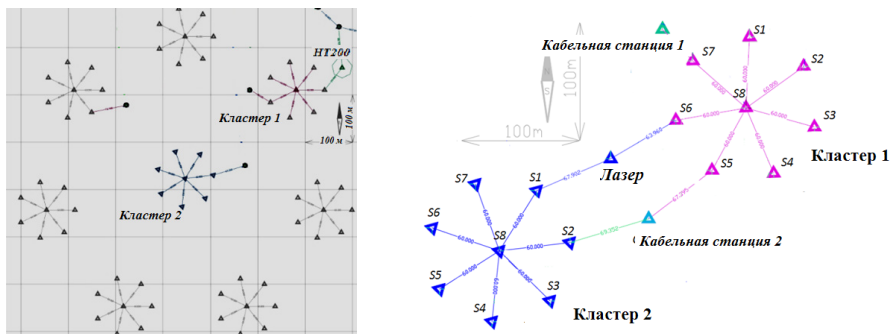


Рис. 13. Конфигурация GVD-1 и схема размещения двух кластеров, введенных в эксплуатацию в 2016 и 2017 гг.

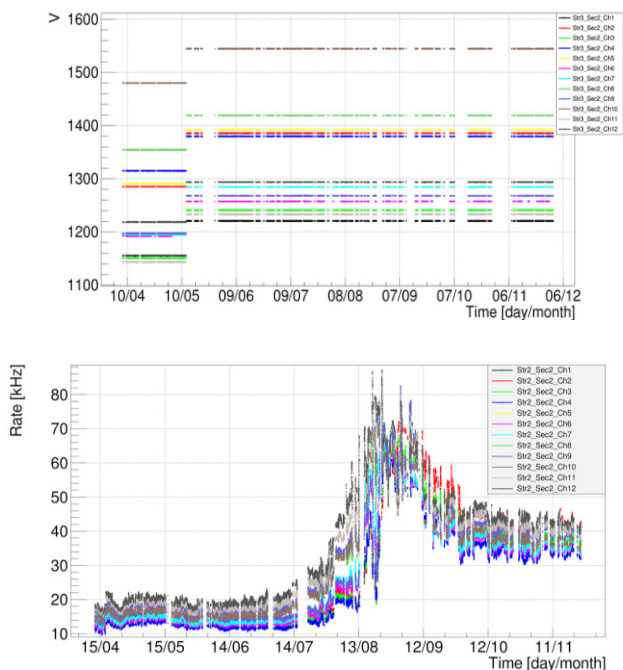


Рис. 14. Результаты годового мониторинга параметров каналов секции: на-пряжения на ФЭУ (слева) и скорость счета шумов каналов (справа)

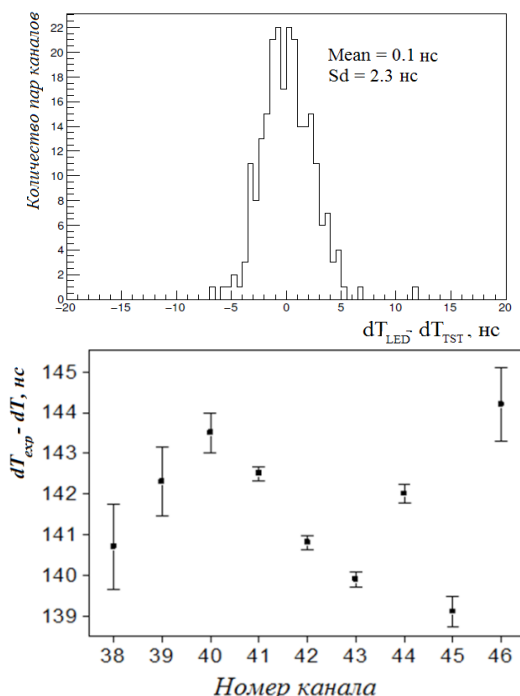


Рис. 15. Распределение по разности между временными сдвигками каналов, измеренными при помощи светодиодной калибровки dT_{LED} и тестового импульса dT_{TST} (вверху), временные сдвигки между секциями, измеренные по разным парам каналов (внизу)

Таблица 1. Статистика работы кластеров (13.04.2017–15.06.2017)

	Время работы, сутки	Эффективность, %	Статистика, события
Кластер 1	64.3	84.4	1.3×10^8
Кластер 2	64.0	87.6	1.0×10^8

Для анализа качества полученного экспериментального материала использовались данные мониторинга состояния аппаратуры и условий регистрации (напряжение на ФЭУ, температура электроники, темп счета измерительных каналов и т.п.), и результаты статистической обработки временных и амплитудных распределений зарегистрированных событий. Результаты мониторинга показали достаточно высокий уровень стабильности параметров регистрирующей системы. Так, например, отклонения высоковольтного напряжения

ФЭУ от номинального значения составили величину меньшую 0,1% в течение года работы (см. рис. 14). Это соответствует стабильности порогов регистрации на уровне 1%. Результаты статистического анализа подтверждают пуассоновский характер потока зарегистрированных событий и корректность процедуры их формирования из мастерных записей разных секций. Результаты годового мониторинга частоты шумовых срабатываний для 12 ОМ, представленные на рис.14, отражают общее поведение всех каналов установки: стабильный темп счета шумов в период апрель – июль (15–20 кГц), увеличение уровня шумов в период август – сентябрь (до 60–70 кГц) и их дальнейшая стабилизация на уровне ~40 кГц.

Экспериментальная оценка надежности каналов была выполнена на основании данных, полученных в период с 2012 по 2015 гг. За этот период времени вышло из строя 4 измерительных канала, а общая наработка аппаратуры составила 400 каналов×год. Это соответствует уровню надежности $\sim 10^{-2} \frac{\text{отказов}}{\text{год}}$. Полученные данные согласуются с теоретической оценкой надежности работы каналов, полученной по методике FIDES. В результате расчетов было получено, что количество отказов измерительных каналов ожидается на уровне $1,3 \times 10^{-2} \frac{\text{отказов}}{\text{год}}$.

Программа исследований аппаратуры нейтринного телескопа в технологических режимах работы включала в себя проверку и оптимизацию методов амплитудной и временной калибровки установки, оценку точности измерения калибровочных коэффициентов и координат оптических модулей, тестирование методов реконструкции событий с использованием калибровочных источников света. Для временной калибровки каналов использовались два подхода. Первый был основан на прямом измерении задержек ФЭУ с использованием тестового импульса, формируемого контроллером ОМ. Разница времен dT_{TST} между сигналом с ФЭУ, генерированным светодиодом, и тестовым импульсом позволяет определить временную сдвигку канала. Для второго метода временной калибровки используются вспышки светодиодов ОМ, регистрируемые двумя ФЭУ соседних каналов секции. Калибровочный коэффициент dT_{LED} определяется как разность по времени между ожидаемой и измеренной задержками сигналов. На рис. 15 показано распределение каналов кластера по разности между калибровочными коэффициентами, полученными двумя способами. Результаты согласуются в преде-

лах ~ 2 нс. Для временной калибровки секций использовались светодиодные источники, расположенные в отдельных глубоководных корпусах. Относительные временные сдвиги секций определяются как разность между ожидаемыми (dT_{exp}) и измеренными (dT) временными задержками между сигналами, зарегистрированными на каналах, расположенных в разных секциях. На рис. 15 представлен пример временной калибровки секций по 9 парам каналов.

Измерение координат глубоководных модулей нейтринного телескопа осуществляется с помощью гидроакустической системы измерения координат, разработанной совместно с компанией EvoLogics специально для Байкальского проекта. На каждой гирлянде телескопа размещено четыре акустических модема (АМ). Один модем располагается около якоря гирлянды, в реперной точке. Три модема располагаются на уровнях 181, 346 и 538 метров от дна оз. Байкал и предназначены для определения координат оптических модулей гирлянды. На рис. 16 представлены результаты измерения положений акустических модемов для разных расстояний от дна оз. Байкал для одного кластера (данные за апрель – июнь 2017 года). Максимальный разброс координат АМ увеличивается с ~ 1 м для нижних модемов до ~ 10 м для верхних модемов. Точность восстановления координат оптических модулей акустической системой позиционирования составляет величину 20–40 см и определяется главным образом точностью вычисления координат ОМ по координатам акустических модемов.

Для комплексной проверки установки использовались два лазерных калибровочных источника света. Они позволили проверить корректность калибровочных процедур, работу гидроакустической системы позиционирования и методику реконструкции событий, регистрируемых нейтринным телескопом. Первый лазерный источник света был разработан для установки НТ200 (длина волны 480 нм, интенсивность от 10^{12} до 6×10^{13} фотонов в импульсе). При помощи этого источника в 2014 году были проведены исследования методики реконструкции параметров каскадных ливней. Положение лазера было восстановлено на основании данных о времени регистрации лазерных импульсов массивом оптических модулей, расположенных на 5 гирляндах. Результаты реконструкции сопоставлялись с координатами лазера, полученными из данных акустической системы позиционирования. Расположение лазера и гирлянд оптических модулей, а

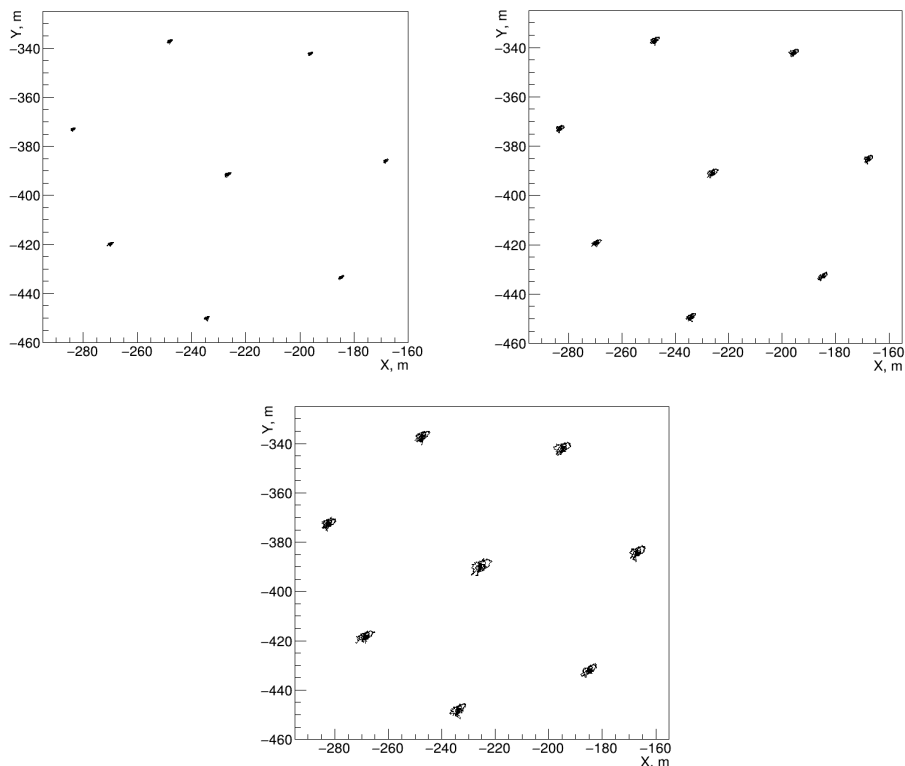


Рис. 16. Результаты измерения положения акустических модемов, установленных на гирляндах второго кластера Baikal-GVD на расстояниях от дна озера 181 м (слева), 346 м (в центре) и 538 м (справа)

также распределение реконструированных координат лазера в горизонтальной плоскости показано на рис. 17. Точность восстановления (медианное значение) координат лазера составила ~ 3 м, что соответствует ожидаемому из расчетов значению.

В дальнейшем, проведение исследований с первым лазером стало невозможным из-за выхода из строя его несущей конструкции. В 2015 году были начаты работы по изготовлению нового лазера для Baikal-GVD, и в 2017 году он был установлен в оз. Байкал. Лазерный источник излучает на длине волны 532 нм. Количество фотонов в импульсе регулируется от $\sim 10^3$ до $\sim 10^{15}$. Лазер был установлен на уровне, равном глубине расположения ЦМ нижних секций гирлянд.

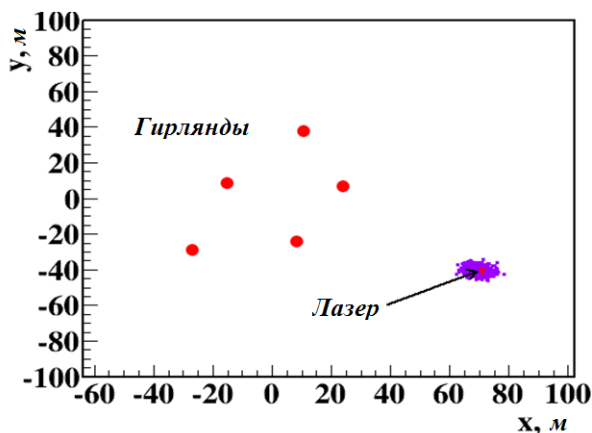


Рис. 17. Результаты реконструкции положения калибровочного лазера в горизонтальной плоскости

На рис. 18 представлен пример регистрации лазерного импульса кластером Baikal-GVD. Цвет характеризует время регистрации сигнала, размер окружности пропорционален логарифму заряда. В правой части рисунка представлено время регистрации сигналов каналами кластера (нумерация каналов от нижнего ОМ первой гирлянды). Точки показывают измеренное значение времени, сплошная линия соответствует ожидаемому времени распространения света от лазера. Согласие ожидаемых и измеренных значений времен указывает на корректность калибровки каналов и достаточно высокую точность измерения координат ОМ.

Атмосферные мюоны и нейтрино могут быть использованы в качестве калибровочного источника для различных типов событий, в частности и для временной калибровки (мюонной калибровки). Мюонная калибровка предназначена для определения временных задержек между соседними каналами (межканальных сдвижек). Методика калибровки основана на сравнении измеренных распределений межканальных задержек ΔT_{μ} с ожидаемыми распределениями, полученными в результате моделирования ΔT_{MC} . На рис. 19 представлены примеры экспериментальных и моделированных распределений межканальных сдвижек. Аналогичные распределения формировались для всех пар каналов установки. Экспериментальные и моделированные распределения межканальных задержек хорошо согласуются друг с другом, что указывает на корректную работу установки в режиме регистрации мюонов.

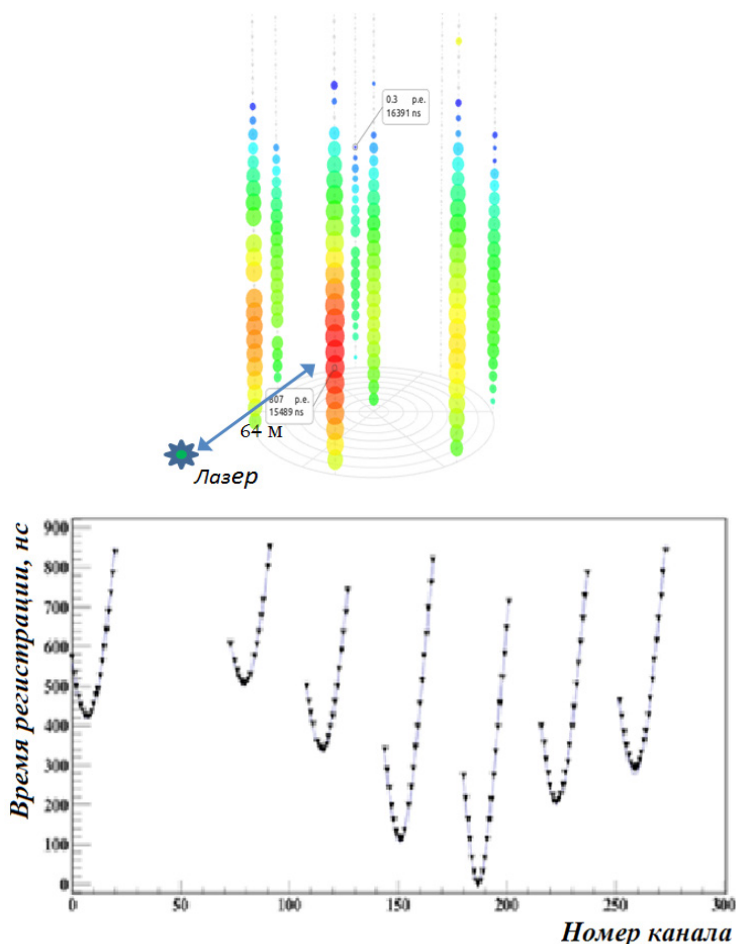


Рис. 18. Пример регистрации лазерного импульса кластером Baikal-GVD

Регистрация атмосферных нейтрино основана на выделении событий, приходящих из нижней полусферы Земли. В настоящее время производится анализ события этого типа по данным 2015 и 2016 годов. В качестве примера на рис. 20 показано одно из событий, инициированных атмосферным нейтрино.

Апробация методики регистрации нейтрино высоких энергий была проведена с использованием данных, полученных на первом кластере “Дубна”. Методика основана на выделении каскадов, образованных в нейтринных взаимодействиях в области чувствительно-

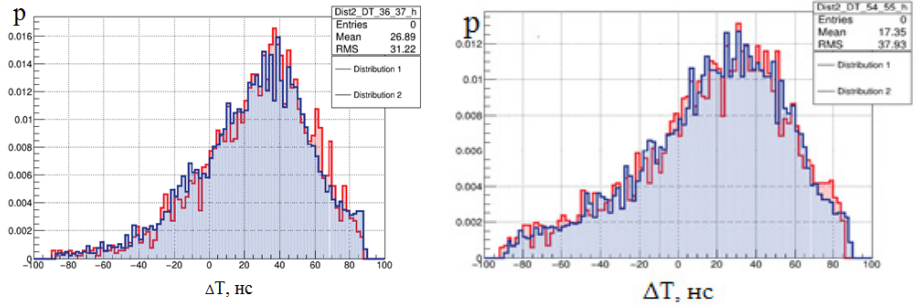


Рис. 19. Примеры экспериментальных (синий цвет) и моделированных (красный цвет) распределений межканальных сдвижек

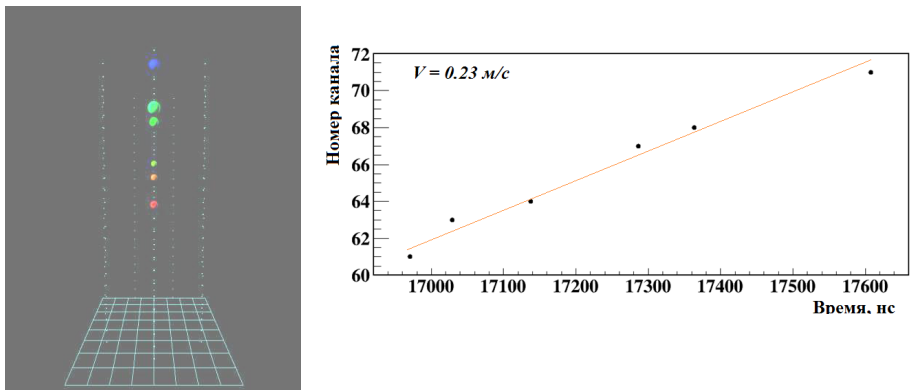


Рис. 20. Пример события, инициированного атмосферным нейтрино

го объема телескопа. Для предварительного анализа использовались данные с 24 октября по 17 декабря 2015 года. За этот период было зарегистрировано $4,4 \times 10^8$ событий. Из полученных данных были отобраны события с множественностью срабатывания каналов $N_{hit} > 3$ (порог 1,5 ф.э.), удовлетворяющих критерию причинности ($1,8 \times 10^7$ событий). После выполнения процедуры реконструкции положения, энергии и направления каскадов $1,3 \times 10^4$ событий были выделены как кандидаты на каскадные ливни. Распределение по множественности срабатывания каналов для выделенных событий и ожидаемый фон от атмосферных мюонов представлены в левой части рис. 21. $1,2 \times 10^3$ событий были реконструированы как каскады с энергией больше 10^2 ТэВ . Распределение по множественности срабатывания каналов для этих событий показано в правой части рисунка. На рисунке также представлены ожидаемый фон от атмосферных мюонов

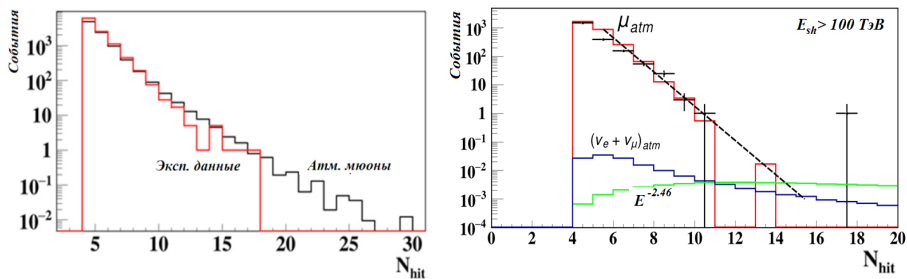


Рис. 21. Распределения по множественности срабатывания каналов для экспериментальных данных и ожидаемого фона атмосферных мюонов (слева), и для событий с реконструированной энергией $>100\text{ТэВ}$ (справа)

и нейтрино и количество ожидаемых событий от нейтрино астрофизической природы со спектром $E^{-2.46}$. Экспериментальное распределение отобранных событий согласуется с ожидаемым фоном от атмосферных мюонов.

Из набора данных было выделено одно событие с $N_{hit}=17$. Анализ выделенного события с пониженными порогами ($\sim 0,5$ ф.э.) показал, что 24 сработавших канала удовлетворяет “каскадной” гипотезе. Реконструированные параметры каскада: энергия 107 ТэВ, зенитный угол 59° , азимутальный угол 131° , расстояния от центра кластера 68 метров. Однако ограниченная статистика как экспериментальных, так и модельных данных в настоящее время не позволяет однозначно интерпретировать природу частицы, инициировавшей выделенный каскадный ливень.

В заключении приведены основные результаты работы.

1. Разработана общая концепция нейтринного телескопа Baikal-GVD, оптимизированная для условий развертывания детектора со льда оз. Байкал, обеспечивающая простоту его наращиваемости и возможность адаптации для решения различных физических задач. Поэтапное развёртывание детектора в виде отдельных кластеров позволило проводить физические исследования уже на ранних стадиях создания установки.
2. Разработана архитектуры системы сбора данных телескопа, обеспечивающая совместное эффективное функционирование ее основных элементов: триггерной системы, систем калибровки и мониторинга, электронных модулей обработки данных и передачи информации.

3. Разработан, создан и исследован в условиях долговременной работы в оз. Байкал комплекс физической аппаратуры, включающий в свой состав глубоководные модули и межмодульные коммуникации, обеспечивающие регистрацию сигналов, выработку триггера, формирование временных кадров событий, предварительную обработку и передачу информации в Береговой центр сбора данных, калибровку каналов установки, управление электропитанием всех узлов детектора.
4. На базе ФЭУ R7081-100 с повышенной квантовой чувствительностью фотокатода ($\sim 35\%$) создан и исследован ключевой элемент системы регистрации нейтринного телескопа Baikal-GVD – глубоководный оптический модуль (ОМ). Характеристики ОМ удовлетворяют основным требованиям, предъявляемым к фотодетекторам крупномасштабных нейтринных телескопов: чувствительность к световому потоку на уровне единичных фотонов, динамический диапазон до $\sim 10^4$ ф.э, временное разрешение на уровне единиц наносекунд, что соответствует угловому разрешению телескопа $\sim 0,5^\circ$.
5. Разработана методика, создано программное и аппаратное обеспечение и налажена процедура подготовки ОМ в условиях их массового производства. Проведены лабораторные испытания и паспортизация более 600 оптических модулей, которые в настоящее время входят в состав первых двух кластеров Baikal-GVD.
6. Разработана и экспериментально проверена методика калибровки измерительных систем телескопа, основанная на использовании светодиодных, лазерных и акустических источников сигналов. Точность временной калибровки каналов детектора составила 2нс, точность восстановления координат каскадных ливней 2-3 м.
7. Годовые испытания первого полномасштабного кластера нейтринного телескопа продемонстрировали работоспособность и устойчивость работы системы регистрации и сбора данных установки в режимах калибровки и регистрации мюонов и каскадных ливней. Общий объем набранной статистики в 2016 году превысил $1,5 \times 10^9$ событий при живом времени экспозиции 235 дней.
8. Проведены долговременные натурные испытания надежности измерительных каналов установки: среднее время наработки на отказ составило. Экспериментальная оценка надежности согласуется с расчетом.

9. В оз. Байкал смонтированы, налажены и введены в эксплуатацию в режиме постоянной экспозиции первые два кластера глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD с эффективным объемом для регистрации каскадных ливней 0,1 куб. км, представляющие собой одну из крупнейших установок Северного полушария.
10. Продемонстрирована возможность развертывания первой очереди установки GVD-1 с эффективным объемом 0,5 км³ в течение 3-4 лет и доказана возможность длительной эксплуатации аппаратуры нейтринного телескопа.

Список основных публикаций по теме диссертации

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

- ших учебных заведений. Физика. Т. 53 №6 (2010) с. 52-61.
10. A. Avrorin, V. Aynutdinov, I. Belolaptikov et al. /The Baikal neutrino experiment // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. V. 626 (2011) p.13-18.
 11. A. Avrorin, V. Aynutdinov, V. Balkanov et al. /The Baikal Neutrino Project: Present and perspective // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. V. 628 (2011) p.115-119.
 12. А.В. Аврорин, В.М. Айнутдинов, И.А. Белолоптиков и др. /Поиск нейтрино от гамма-всплесков на Байкальском нейтринном телескопе НТ200 // Письма в Астрономический журнал: Астрономия и космическая астрофизика. Т. 37 №10 (2011) с. 754-760.
 13. A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, I.A. Belolaptikov et al. /The Baikal neutrino telescope - Results and plans // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. V. 630 (2011) p. 115-118.
 14. A. Avrorin, V. Aynutdinov, I. Belolaptikov et al. /The Gigaton volume detector in lake Baikal // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. V. 639 (2011) p. 30-32.
 15. А.В. Аврорин, В.М. Айнутдинов, И.А. Белолоптиков и др. /Статус байкальского нейтринного эксперимента // Известия РАН, сер. Физ. Т. 75. № 3 (2011) с. 443-444.
 16. А.В. Аврорин, В.М. Айнутдинов, И.А. Белолоптиков и др. /Экспериментальная гирлянда Байкальского нейтринного телескопа НТ1000 // Приборы и Техника Эксперимента, № 5 (2011) с. 55-65.
 17. A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, I.A. Belolaptikov et al. /Status of the BAIKAL-GVD project // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. V. 692 (2012) p. 46-52.
 18. A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, I.A. Belolaptikov et al. /Current status of the BAIKAL-GVD project // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. V. 725 (2013) p. 23-26.
 19. A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, I.A. Belolaptikov et al. /Present status of the BAIKAL-GVD project development // Journal of Physics: Conference Series. V. 409 #1 (2013).
 20. A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /The prototyping/early construction phase of the BAIKAL-GVD project // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. V. 742 (2014) p. 82-88.
 21. А.В. Аврорин, А.Д. Аврорин, Айнутдинов В.М. и др. /Система сбора данных Байкальского нейтринного телескопа НТ1000// Приборы и Техника Эксперимента. № 3 (2014) с. 28-39.

22. А.В. Аврорин, А.Д. Аврорин, В.М. Айнутдинов и др. /Статус и последние результаты проекта Байкал-ГВД // Физика элементарных частиц и атомного ядра. Т. 46, Вып. 2 (2015) с 211-221.
23. A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /Status of the Baikal-GVD Project // Proceedings 16th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics: Particle Physics at the Year of Centenary of Bruno Pontecorvo (2015) p. 99–101.
24. A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /The optical module of Baikal-GVD // EPJ Web of Conferences. V. 116 (2016) p. 01003.
25. A.V. Avrorin, A.D. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /Baikal-GVD results // EPJ Web of Conferences. V. 116 (2016) p. 11005.
26. A.V. Avrorin, A.D. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /Status of the early construction phase of Baikal-GVD // Nuclear and Particle Physics Proceedings. V. 273 (2016) p. 314-320.
27. A.V. Avrorin, A.D. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /The data acquisition system for Baikal-GVD // EPJ Web of Conferences. V. 116 (2016) p. 5004.
28. A.V. Avrorin, A.D. Avrorin, V. M. Aynutdinov et al. /The optical detection unit for Baikal-GVD neutrino telescope // EPJ Web of Conferences. V. 121 (2016) p. 05008.
29. A.V. Avrorin, A.D. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /The optical module of Baikal-GVD // EPJ Web of Conferences. V. 116 (2016) p. 1003.
30. A.V. Avrorin, A.D. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /Status and perspectives of the BAIKAL-GVD project // EPJ Web of Conferences. V. 121 (2016) p. 5003.
31. А.В. Аврорин, А.Д. Аврорин, В.М. Айнутдинов и др. /Оптический модуль Глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD // Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра. Т. 13 № 6 (2016) с. 756–766.
32. A.V. Avrorin, A.D. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /Baikal-GVD: Results, status and plans // The European Phys. J. Web of Conferences. V. 116 (2016) p. 11005.

Научное издание

Айнутдинов Владимир Маратович

Кластер Baikal-GVD — основная структурная единица
Байкальского глубоководного нейтринного телескопа

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 2,05 Зак. № 22421 Тираж 80 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел

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