

*На правах рукописи*

**Шейфлер  
Алексей Александрович**

**Оптический модуль  
Байкальского глубоководного  
нейтринного телескопа BAIKAL-GVD  
(разработка и испытания регистрирующей системы)**

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2016

*вк. w2  
24.09.2017*

На правах рукописи

**Шейфлер  
Алексей Александрович**

**Оптический модуль  
Байкальского глубоководного  
нейтринного телескопа BAIKAL-GVD  
(разработка и испытания регистрирующей системы)**

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

Москва — 2016

Вх. № 2 Ер. Ф. И. 24.01.17  
Научно-тех. библиотека

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:**

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

*Якушев Евгений Александрович*, кандидат физико-математических  
наук, Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория  
ядерных проблем им. В. П. Джелепова, начальник сектора № 1.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

Защита состоится 15 ДЕК 2016 в 12:30 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](http://www.inr.ru).

Автореферат разослан 14 НОЯ 2016

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.119.01

доктор физико-математических наук

С. В. Троицкий

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследования

Изучение астрофизических 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. Наряду с проблемами астрофизики, нейтринные телескопы и их инфраструктура используется во многих других областях науки и техники, таких как гидроакустика, гидробиология, гидрология, океанология, геология, геофизика, гляциология.

К наиболее значимым из введенных в эксплуатацию и проектируемых нейтринных телескопов следует отнести IceCube (Южный полюс), на котором впервые были зарегистрированы нейтрино астрофизической природы, ANTARES (Франция) и KM3Net (проект, объединяющий нейтринные телескопы Средиземного моря).

В настоящее время в оз. Байкал на базе установки НТ-200 создается глубоководный нейтринный телескоп масштаба кубического километра Baikal-GVD (НТ1000). Телескоп представляет собой пространственную решетку фотодетекторов (оптических модулей), регистрирующих излучение Вавилова-Черенкова заряженных частиц—

продуктов взаимодействия нейтрино. Оптические модули (ОМ) нейтринного телескопа сгруппированы в виде кластеров—функционально законченных блоков установки, способных регистрировать нейтринные события как в составе полномасштабного детектора, так и в автономном режиме. Кластеры в свою очередь формируются из гирлянд оптических модулей, что позволяет осуществлять монтаж установки со льда оз. Байкал.

Характеристики фотоприемников оптических модулей и функциональность их электронных узлов в значительной степени определяют параметры нейтринного телескопа: величину эффективного объема детектора, энергетическое и угловое разрешение установки, надежность и стабильность работы регистрирующей системы в целом. В свою очередь конструкция оптических модулей является одним из определяющих факторов для оперативного развертывания крупномасштабной установки, содержащей более двух тысяч ОМ. Данная работа посвящена проблемам оптимизации и создания оптического модуля для байкальского нейтринного телескопа Baikal-GVD.

#### **Цель работы и методы исследования**

Цель работы заключается в разработке оптического модуля, оптимизированного для работы в составе Байкальского нейтринного телескопа Baikal-GVD и разработке автоматизированной системы для калибровки и проверки оптических модулей в условиях их массового производства.

Оптический модуль должен эффективно регистрировать слабые вспышки излучения Вавилова–Черенкова (вплоть до единичных фотонов) с временным разрешением на уровне единиц наносекунд, выдерживать гидростатическое давление до глубин не менее ~1,5 км, обеспечивать возможность управления и мониторинга параметров ОМ и проведения амплитудной и временной калибровки каналов установки. Конструкция ОМ должна быть оптимизирована для опе-

ративного монтажа модулей на несущие кабельные коммуникации в процессе развертывания установки со льда оз. Байкал.

Задачами работы являлись:

- оптимизация конструкции и функционального состава блока электроники оптического модуля;
- разработка аппаратуры систем регистрации, управления, калибровки и мониторинга параметров оптического модуля;
- создание аппаратуры и программного обеспечения испытательных стендов для исследования характеристик оптических модулей и их комплектующих элементов;
- проведение комплексных лабораторных исследований характеристик оптических модулей;
- наладка процедуры подготовки ОМ в условиях их массового производства;
- долговременные натурные испытания ОМ в оз. Байкал в составе первой очереди кластера Baikal-GVD.

#### **Научная новизна и практическая значимость**

Разработанный в рамках диссертационной работы оптический модуль является основным регистрирующим элементом уникальной установки: глубоководного нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD. Оптические модули сочетают в себе простоту конструкции, обеспечивающую возможность их надежной и быстрой сборки и оперативного монтажа со льда оз. Байкал, и функциональную законченность, позволяющую диагностировать их состояние и осуществлять проверку, калибровку и мониторинг параметров в режиме удаленного доступа.

Методика и программное обеспечение, созданное для автоматизированной калибровки, проверки и паспортизации оптических модулей зарегистрированы в Реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности 19 сентября 2012 г.

(свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012618470). Разработанная методика и программное обеспечение автоматизированной калибровки и проверки могут быть использованы в детекторах, в регистрирующих системах которых применяются фотоэлектронные умножители.

#### **Личный вклад автора**

1. Автор принимал непосредственное участие в создании оптического модуля глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD: разработке конструкции ОМ, разработке блока электроники ОМ, системы калибровки и мониторинга параметров модуля.
2. Автор является деятельным участником восьми зимних экспедиций на оз. Байкал, в период между экспедициями исполнял обязанности дежурного оператора на телескопе.
3. Автором разработаны и внедрены методика и программное обеспечение для автоматизированной калибровки, проверки и паспортизации оптических модулей.
4. Автором была осуществлена калибровка, проверка и подготовка к работе прототипов оптических модулей (2007–2008 гг.), оптических модулей экспериментальных гирлянд в 2009–2012 годах и оптических модулей первого кластера Baikal-GVD 2013–2016 гг. В общей сложности оптимизированы параметры и проведена калибровка для более 300 ОМ, установленных в оз. Байкал.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Создание системы регистрации черенковского излучения мюонов и каскадных ливней оптического модуля Байкальского глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD.
2. Разработка встроенных в оптический модуль систем контроля и калибровки, позволяющих измерять временную задержку ОМ с точностью  $\sim 2$  нс и контролировать линейность спектрометрического канала в диапазоне до  $\sim 10^3$  фотоэлектронов.

3. Разработка алгоритмов и программного обеспечения для автоматизированной калибровки, контроля и паспортизации оптических модулей, обеспечивающих измерение основных параметров ОМ и выравнивание их коэффициентов усиления с точностью не хуже 10 %.
4. Результаты измерений временных, амплитудных и шумовых характеристик оптических модулей, входящих в настоящее время в состав первого кластера глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD.
5. Результаты долговременных натуральных испытаний ОМ (суммарное время работы всех оптических модулей в составе телескопа составило  $\sim 400$  лет).

#### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы были представлены в виде докладов на рабочих совещаниях сотрудничества «Байкал» (2008–2016 гг.) и Международных конференциях и совещаниях: RISCAP (2007, 2014), ICRC (2015), VLVNT (2015).

По теме диссертации опубликованы 8 печатных работ, в числе которых 2 статьи в международных рецензируемых журналах, 2 статьи в материалах международных научных семинаров и 4 статьи в российских рецензируемых журналах. А также зарегистрированы один патент на полезную модель и одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Списки опубликованных работ и результатов интеллектуальной деятельности приведены в конце автореферата.

## Содержание работы

### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка иллюстративного материала и таблиц, списка сокращений и условных обозначений, списка терминов, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 166 страниц, включая 106 рисунков, 20 таблиц и список цитируемой литературы из 89 ссылок.

### Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются цель и основные задачи исследования. Излагается научная и практическая значимость полученных результатов диссертационной работы. Перечисляются положения, выносимые на защиту, и указываются данные об апробации работы и личном вкладе автора. Также описывается структура диссертации.

В первой главе рассматриваются различные типы фотодетекторов (оптических модулей), разработанных для нейтринных телескопов: NEBOD, AMANDA, IceCube, ANTARES, NESTOR, NEMO, HT-200, KM3Net и обсуждается влияние на выбор основных параметров оптических модулей условий их эксплуатации: характеристик излучения Вавилова-Черенкова, величины светового фона, инфраструктуры телескопа и способов его развёртывания, организации системы сбора данных.

В конце главы приводится сравнение характеристик оптических модулей по следующим параметрам:

- типу и конфигурации фотодетекторов;
- методам обработки и передачи сигналов;
- подходам к минимизации электропотребления;
- конструкции глубоководного корпуса (в т. ч. методике монтажа ФЭУ и типу магнитных экранов).

Во второй главе представлено обоснование требований к техническим и конструктивным параметрам оптического модуля Vairal-GVD:

- оптический модуль должен иметь аналоговый выход, длительность аналогового сигнала не менее 20–25 нс, передний фронт не менее ~10 нс;
- энергопотребление ОМ не должно превышать ~5 Вт, электропитание и сигналы ОМ должны передаваться по разным проводникам;
  - корпус оптического модуля должен соответствовать ряду требований:
  - прозрачность в диапазоне длин волн черенковского излучения и квантовой чувствительности фотоэлектронного умножителя;
  - надежная защита от попадания воды внутрь корпуса и гидростатического давления до ~1,5 км;
  - экранирование ФЭУ от магнитного поля Земли;
  - обеспечение оптического контакта между корпусом и стеклом колбы ФЭУ;
  - оснащение герметичным глубоководным разъемом для вывода сигнала ФЭУ, ввода электропитания и линии управления RS-485;
- электроника ОМ должна обеспечивать возможность управления напряжением на фотоэлектронном умножителе, усиление сигнала с выхода ФЭУ, мониторинг и калибровку параметров ОМ;
- ОМ должен обладать высоким уровнем надежности и эргономичности, что обеспечивается следующими решениями:
  - использованием высоконадежных глубоководных разъемов для подключения ОМ к системам телескопа с возможностью «мокрого» подсоединения,
  - минимизацией количества разъемов на один ОМ,

- простотой монтажа (демонтажа) ОМ к несущему кабелю гирлянды телескопа,
- простотой сборки ОМ и минимизацией трудозатрат на эту процедуру,
- снижение затемнения ОМ конструктивными элементами.

В третьей главе описываются конструкция ОМ и принцип его работы, а также характеристики основных компонентов ОМ.

Общий вид оптического модуля представлен на рисунке 1. ОМ состоит из следующих основных компонент:

- глубоководный корпус, в том числе разъем, узел крепления к тросу, магнитный экран и иммерсионный материал;
- фотодетектор: фотоэлектронный умножитель;
- блок электроники.

Фотоэлектронный умножитель с полусферическим фотокатодом размещается в 17-ти дюймовом (42 см), сферическом, глубоководном корпусе VITROVEX, на который устанавливается блочный 5-и штырьковый глубоководный разъем SUBCONN LPBH5FSS и вакуумный порт. Через вакуумный порт производится откачка воздуха из ОМ до давления  $\sim 0,7$  атм, достаточного для надежной фиксации двух полусфер глубоководного корпуса между собой.

Пространство между ФЭУ и стеклянным корпусом заполняется силиконовым гелем SilGel 612A/B (показатели преломления боросиликатного стекла 1,47, силиконового геля 1,404, воды 1,33). Гель надежно фиксирует ФЭУ в глубоководном корпусе и обеспечивает необходимую эластичность для компенсации возможных механических воздействий во время транспортировки ОМ и деформации глубоководного корпуса ОМ под действием высокого внешнего давления на глубине. Для уменьшения влияния магнитного поля Земли на работу фотоэлектронного умножителя, ФЭУ защищен экраном (сеткой) из ожеженного пермаллоя, уменьшающей влияние магнитного поля Земли на величину сигнала ФЭУ при его повороте с  $\sim 30$  % до 5–8 %.

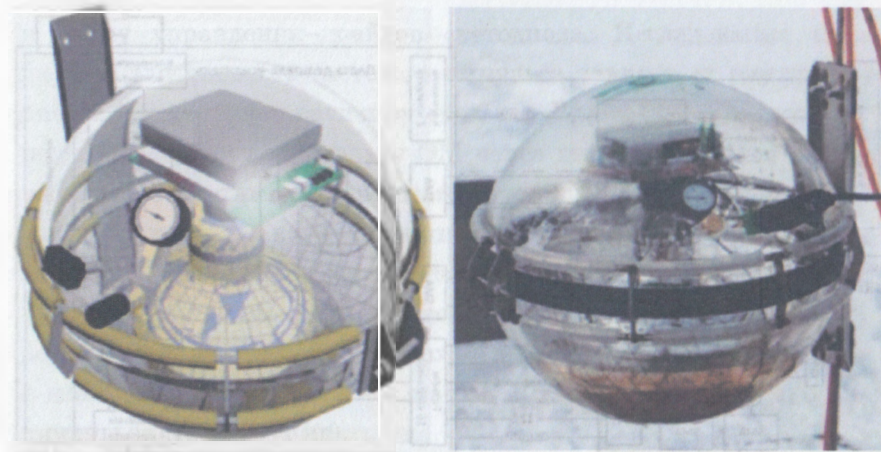


Рис. 1. Модель оптического модуля (слева) и фотография оптического модуля смонтированного на гирлянде (справа)

Блок электроники оптического модуля устанавливается непосредственно на цоколь ФЭУ. Непосредственно на разьеме SUBCONN устанавливается коммутационная плата с клеммным соединителем и высокочастотным коаксиальным разъемом SMA. Через коаксиальный разъем передается аналоговый сигнал с ФЭУ, через клеммник – электропитание и сигналы управления RS-485 (земли коаксиала и электропитания объединены). В состав блока электроники ОМ входят источник высоковольтного напряжения, плата делитель-усилитель и блок управления (контроллер ОМ), включающий в себя светодиодную калибровочную систему. Блок-схема электроники ОМ представлена на рисунке 2.

Источник высоковольтного напряжения TRACO POWER PHV12-2.0K2500P (Япония) обеспечивает электропитание делителя ФЭУ напряжением положительной полярности (максимальный выходной ток 1 мА) в диапазоне от 0 до 2,5 кВ с точностью не хуже 1 В. Применяется схема делителя с заземленным фотокатодом. Для изоляции высоковольтного напряжения применяется разделительный конденсатор. Полное сопротивление делителя составляет 18 МОм.

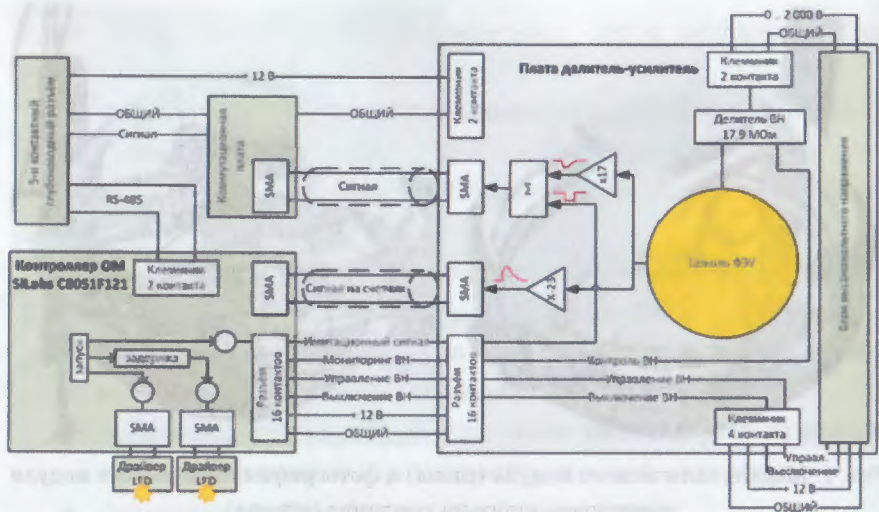


Рис. 2. Блок-схема электроники ОМ

Для достижения требуемой величины однофотоэлектронного сигнала (25–30 мВ) сигнал с ФЭУ усиливается. Функцией усилителя является также и оптимизация формы аналогового сигнала для измерения его заряда и времени регистрации при помощи АЦП с частотой дискретизации 200 МГц. Усилитель монтируется на одной плате с делителем напряжения ФЭУ и включает в свой состав два канала усиления. Первый канал (спектрометрический) с коэффициентом усиления  $\sim 14$  предназначен для формирования аналогового сигнала для АЦП. Общий коэффициент усиления канала составляет величину  $\sim 10^8$  (усиление ФЭУ  $\sim 10^7$ , ослабление в 90-метровом глубоководном кабеле  $\sim 0,7$ , коэффициент преобразования усилителя  $\sim 14$ ). Второй канал инвертирует сигналы ФЭУ и усиливает их в  $\sim 20$ . Эти сигналы поступают на счетчик шумовых импульсов контроллера ОМ для измерения уровня шумов канала.

Калибровочная система ОМ реализована на основе двух светодиодных источников света и генератора сигналов, имитирующих импульс с ФЭУ (проверочный импульс). Светодиодный источник света включает в свой состав синий светодиод Kingbright L7113 PBC-A

и схему управления-драйвер светодиода. Исследования показали, что длительность светового импульса зависит от партии светодиодов и составляет величину  $\sim 5-7$  нс. Драйверы со светодиодами подключаются к контроллеру ОМ через высокочастотные разъемы SMA. Перекрестные наводки между светодиодными каналами достаточно низкие: меньше 1%. Диапазон регулирования интенсивности вспышек светодиодов составляет  $0-10^8$  фотонов (регулировка производится независимо для каждого светодиода). Также предусмотрена возможность регулировки задержки между импульсами светодиодов в диапазоне от 0 до 1000 нс с шагом  $\sim 100$  нс (точность установки величины задержки  $\sim 1$  нс).

Светодиоды в оптическом модуле направлены вверх относительно фотокатода ФЭУ. Такая геометрия обеспечивает примерно равную засветку фотоэлектронных умножителей, расположенных в оптическом модуле, формирующем светодиодные вспышки, и в ОМ, закрепленном выше по тросу на гирлянде. Измерение разницы времен регистрации светодиодных сигналов на парах соседних модулей позволяет осуществлять относительную временную калибровку каналов.

Для измерения абсолютной временной задержки канала сигнал, синхронизированный во времени с сигналом запуска светодиода, подается на выходной каскад усилителя измерительного канала ОМ. В результате формируется два сигнала: синхроимпульс от генератора ОМ и импульс, формируемый ФЭУ при вспышке светодиода. Временной интервал между этими импульсами определяется задержкой прохождения сигнала в фотоэлектронном умножителе. Для абсолютной временной калибровки канала задержка сигнала в ФЭУ складывается с задержкой сигнала в глубоководном кабеле данного канала (кабельные задержки калибруются независимо).

Для амплитудной калибровки канала измеряется однофотоэлектронное распределение сигналов ФЭУ, формируемое при подсветке фотокатода импульсами светодиода малой интенсивности (вероятность формирования импульса не превышает 10% на вспышку). Для

выделения таких импульсов из фона однофотозлектронных шумовых срабатываний ФЭУ используется импульс со второго светодиода с большой амплитудой (~100 ф.э.), задержанный относительно первого светодиода, работающего в однофотозлектронном режиме на ~200 нс.

Светодиодная калибровочная система ОМ позволяют производить проверку линейности измерительных каналов. Используется методика проверки линейности не требующая использования источников света с линейными характеристиками. Для проверки анализируется параметр  $R = Q(L1+L2) / (Q(L1)+Q(L2))$ , где  $Q(L1)$  и  $Q(L2)$  — заряды сигналов, измеренные при подсветке ФЭУ поочередно первым и вторым светодиодом, а  $Q(L1+L2)$  — заряд, измеренный при подсветке одновременно двумя светодиодами ОМ.

Система управления оптическими модулями разработана на основе микроконтроллера SiLabs C8051F121. В функции микроконтроллера входит управление ОМ и мониторинг значений основных параметров ОМ (температуры, скорости счета шумов ФЭУ, уровней высоковольтного напряжения ФЭУ, напряжений электропитания ОМ). К внутренней шине контроллера I2C допускается подключение дополнительных датчиков: давления, влажности, температуры, ориентации. Управление контроллером ОМ осуществляется по линии связи, организованной на базе интерфейса RS-485.

В таблице 1 представлены основные характеристики оптического модуля.

Таблица 1. Основные характеристики ОМ Baikal-GVD

Характеристика	Значение
Корпус	VITROVEX 17"
Показатель преломления стекла корпуса	1,47
Разъем	SUBCONN LP-VH5FSS, 5 контактов
Иммерсионный материал	2-хкомпонентный силиконовый гель WACKER SilGel® 612 A/B

Показатель преломления силиконового геля	1,40
Фотодетектор	ФЭУ R7081-100
Количество ФЭУ	1
Характеристики ФЭУ: квантовая чувствительность	35 %
диаметр фотокатода	254 мм
минимальная эффективная область	Ø 220 мм
область спектральной чувствительности	300–650 нм
временное разрешение (TTS)	3,4 нс
уровень собственных шумов	8 кГц
напряжение (усиление $10^7$ )	1500 В
Сопротивление делителя напряжения (пассивный делитель)	18 МОм
Параметры выходного сигнала: передний фронт	12 нс
длительность импульса (область линейности)	25 нс
однофотозлектронная амплитуда	25–30 мВ
Энергопотребление	300 мА × 12 В
Калибровочная система: количество светодиодов	2
тип светодиодов	Kingbright L7113 PBC-A
длина волны в максимуме излучения	470 нм
диапазон регулировки интенсивности излучения	0– $10^8$ фотонов на вспышку
диапазон регулировки задержек светодиода	0–1000 нс
уровень наводок с канала на канал	< 1 %
Система мониторинга: контроль напряжение на ФЭУ	реализован
контроль скорости счета шумов	реализован
контроль температуры и напряжений электропитания	реализован
Способ монтажа на трос	Рама из нержавеющей стали
Температура эксплуатации	-20 ... +40 °C
Температура хранения	-40 ... +40 °C

В четвертой главе приводится описание автоматизированного стенда для исследований ОМ и их паспортизации, представлены методика измерения параметров оптических модулей и статистический анализ полученных результатов.

Проверка и калибровка ОМ выполнялась на стенде, созданном на базе цифрового 4-х канального осциллографа LeCroy HDO 4034 (полоса пропускания 350 МГц, частота дискретизации до 2,5 ГГц). ОМ устанавливались в светоизолированный, экранированный от электромагнитного излучения силовой сети (50 Гц) бокс, вмещающий до 4-х ОМ одновременно, и подключались к входам осциллографа 90-метровыми глубоководными кабелями, используемые в телескопе. В качестве калибровочных источников света использовались светодиоды, установленные в ОМ. Процедура измерения параметров ОМ полностью автоматизирована.

Программное обеспечение стенда разработано в среде Microsoft Visual Basic for Application 7.0, входящей в состав Microsoft Excel. Для управления осциллографом используется пакет для интеграции от производителя прибора LeCroy HDO 4034 с Microsoft Excel. Для соединения с TCP/IP сервером (NPort 5150) используется библиотека Windows Client / Server Communications for Visual Basic (CSC4VB) Version 6.2 от 21.02.2012, разработанная компанией Marshallsoft.

Полная проверка ОМ включает в себя следующие основные процедуры:

- измерение зависимости параметров оптического модуля от величины высоковольтного напряжения;
- измерение характеристик ОМ при регистрации слабых световых сигналов (одnofотоэлектронный режим работы ФЭУ);
- измерение зависимости параметров ОМ от уровня подсветки ФЭУ (многофотозлектронный режим работы ФЭУ);
- измерение параметров вспомогательных систем ОМ: формирования проверочных импульсов и счетчика срабатываний канала;
- измерение послеимпульсов;
- измерение кривой насыщения.

В таблице 2 представлены результаты измерений основных характеристик оптических модулей. Все измеренные характеристики сохранены в банке данных ОМ. На основании этих характеристик формируются паспорта индивидуальных оптических модулей.

Таблица 2. Основные характеристики ОМ

Характеристика	Значение
Коэффициент усиления канала	$(1,000 \pm 0,0079) \cdot 10^8$
О.ф.э. разрешение	$0,44 \pm 0,027$
Отношение пик-долина	$1,9 \pm 0,40$
Кривая насыщения-функция $y(N_{\text{ф.э.}}) = Q_{\text{мфэ}} / (Q_{\text{офэ}} \cdot N_{\text{ф.э.}})$	$y = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^p}$ $x = \lg N_{\text{ф.э.}}$ $x_0 = 2,681,$ $p = 8,67.$
Временные характеристики канала	
Разброс времени пролета	$3,6 \pm 0,31$ нс
Задержка о.ф.э. сигнала $D$ от величины высоковольтного напряжения $HV$	$D = a \cdot HV + b$ $a = -0,024; b = 129$
Характеристики калибровочной системы	
Задержка сигнала на первом светодиоде	$2,0 \pm 0,86$ нс
Задержка сигнала на втором светодиоде	$1,3 \pm 0,83$ нс
Характеристики проверочного импульса	
Задержка	$23 \pm 1,1$ нс
Амплитуда	$377 \pm 15$ мВ
Ширина	$92,6 \pm 0,15$ нс
Передний фронт	$47,3 \pm 0,74$ нс
Задний фронт	$56 \pm 1,0$ нс

В пятой главе описан процесс подготовки оптических модулей в условиях их массового производства, обеспечивающий требуемый

уровень их надежности. Надежность работы ОМ определяется следующими факторами:

- надежностью электронных узлов, входящих в состав ОМ;
- надежностью герметизации глубоководного корпуса ОМ;
- методикой испытаний как отдельных компонентов оптического модуля на разных этапах его подготовки, так и ОМ в целом.

Схема, описывающая основные этапы сборки и подготовки оптических модулей и методику испытаний аппаратуры на этих этапах, представлена на рисунке 3.

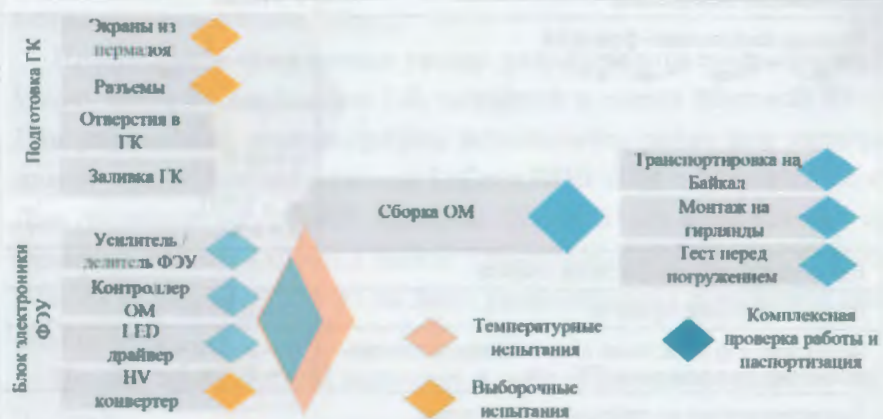


Рис. 3. Схема поэтапной подготовки и испытаний ОМ

Представленная организация испытаний ОМ была внедрена с 2014 года и достаточно хорошо зарекомендовала себя с точки зрения отбраковки неисправных узлов и модулей в целом. В частности, в результате тестирования блоков электроники ОМ при повышенной температуре были выявлены неисправности в узлах управления контроллера и отбраковано два комплекта электроники ОМ.

В шестой главе представлены выборочные результаты натуральных испытаний ОМ в оз. Байкал, а также работы их в составе первого кластера Baikal-GVD, который был введен в эксплуатацию в 2015

году: мониторинг параметров ОМ, результаты калибровки ОМ, регистрации мюонов и дана оценка надежности ОМ.

Работы над созданием Baikal-GVD проводятся с 2009 года. Основные этапы создания кластера представлены на рисунке 4. Полномасштабный кластер Baikal-GVD был введен в эксплуатацию в апреле 2015 года. Схематический вид кластера показан в нижней части рисунка 4. Радиус кластера 40 метров, высота кластера (длина гирлянд) 345 метров, общее количество оптических модулей

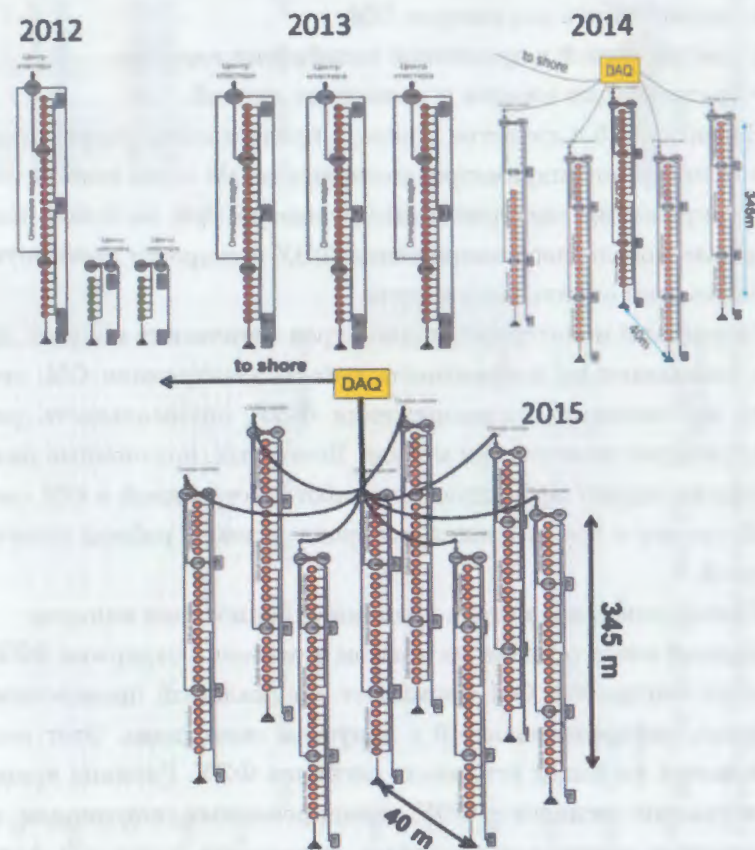


Рис. 4. Основные этапы создания первого кластера Baikal-GVD

192 шт. Расстояние от верхних ОМ до поверхности озера около 1 км. В экспедицию 2016 г. каждая гирлянда кластера была дополнена одной секцией и увеличен радиус кластера до 60 м. Таким образом, общее количество ОМ составило 288 шт., расположенных на глубинах от 750 до 1275 м (расстояние по глубине между модулями 15 м).

Одной из основных задач, которая решалась во время эксплуатации кластера, была проверка корректности работы всех основных систем установки, в первую очередь оптических модулей. Проверка оптических модулей производилась во всех режимах их эксплуатации:

- мониторинга параметров ОМ;
- амплитудной и временной калибровки каналов;
- регистрации мюонов и каскадных ливней.

На рисунке 5 в качестве примера представлены результаты годового мониторинга параметров двенадцати ОМ (одна секция установки): напряжения электропитания, температуры на плате контроллера, высоковольтного напряжения ФЭУ и скорости счета шумовых срабатываний оптического модуля.

Результаты мониторинга параметров оптических модулей, во-первых, указывают на корректность работы электроники ОМ: стабильность высоковольтного напряжения ФЭУ, оптимальность режима эксплуатации электроники модуля. Во-вторых, полученные результаты подтверждают эффективность работы встроенной в ОМ системы мониторинга с точки зрения контроля условий работы оптических модулей.

Применялись два метода временной калибровки каналов:

1. Первый метод основан на прямом измерении задержек ФЭУ. Для этого контроллер ОМ формирует специальный проверочный импульс, синхронизированный с запуском светодиода. Этот импульс подается на выход усилителя сигналов ФЭУ. Разница времен регистрации сигналов с ФЭУ, генерированных светодиодом, и проверочных импульсов позволяет определить задержку фотозлектронного умножителя.

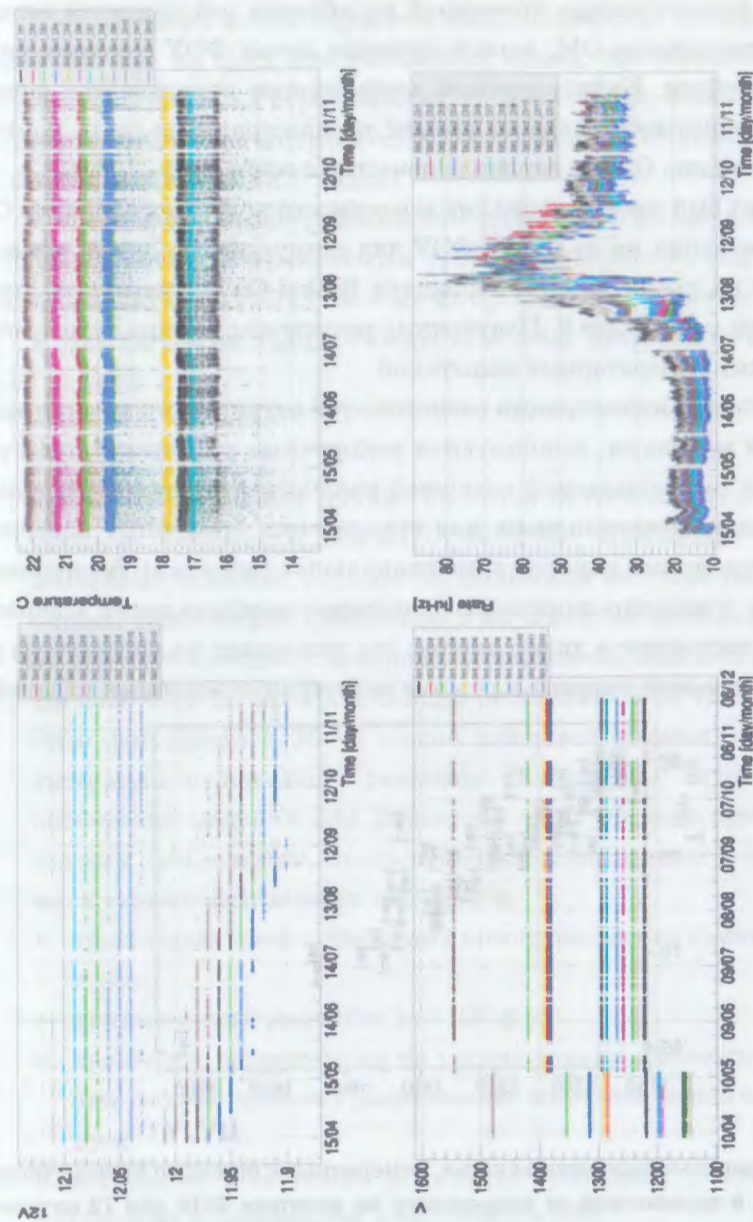


Рис. 5. Данные годового мониторинга параметров ОМ: напряжения электропитания (слева сверху), температура контроллера (справа сверху), высоковольтного напряжения на ФЭУ (слева снизу) и темпа счета шумов (справа снизу)

2. Для второго метода временной калибровки используются вспышки светодиодов ОМ, регистрируемые двумя ФЭУ соседних каналов секции. Калибровочный коэффициент определяется исходя из вычислений разности времен распространения света до ФЭУ (положение ОМ на гирлянде известно с точностью  $\sim 10$  см).

Также был проведен анализ зависимости задержек сигналов ОМ от напряжения на делителе ФЭУ для оптических модулей, установленных на трех гирляндах кластера Baikal-GVD. Результаты представлены на рисунке 6. Полученные результаты хорошо согласуются с данными лабораторных испытаний.

В качестве иллюстрации возможностей регистрации мюонов оптическими модулями, используются выборочные результаты, полученные при так называемой «мюонной калибровке» каналов. Мюонная калибровка предназначена для определения временных задержек между соседними каналами (межканальных задержек). Экспериментальные и моделированные распределения межканальных задержек хорошо согласуются друг с другом, что указывает на корректную работу оптических модулей в режиме регистрации мюонных событий.

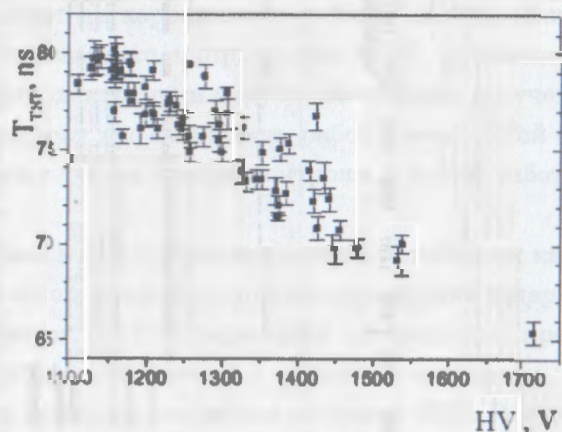


Рис. 6. Временные задержки каналов, измеренные с помощью проверочного импульса, в зависимости от напряжения на делителе ФЭУ для 72 оптических модулей Baikal-GVD

На настоящий момент времени общая наработка на отказ составляет 400 лет на один измерительный канал, что соответствует вероятности выхода из строя канала  $\sim 1$  % в год. Вероятность выхода из строя оптических модулей составляет половину от этой величины:  $\sim 0,5$  % в год (MTBF  $\sim 10^6$  часов).

С точки зрения работоспособности установки в целом, выход 0,5 % ОМ в год является приемлемым уровнем надежности ОМ с учетом возможности проведения ежегодных профилактических работ.

В заключении представлены основные результаты выполненной работы.

### Заключение

1. Проведен детальный анализ проектов оптических модулей нейтринных телескопов: AMANDA, IceCube, ANTARES, NESTOR, DUMAND, KM3Net, HT200+ на основании которого были разработаны технические требования к параметрам оптического модуля для глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD.
2. На базе ФЭУ R7081-100 с повышенной квантовой чувствительностью фотокатода ( $\sim 35$  %) создан 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  $\sim 10^3$  ф.э;
  - временное разрешение на уровне единиц наносекунд, что соответствует угловому разрешению телескопа менее одного градуса.
3. Конструкция оптического модуля разработана с учетом особых требований к надежности и эргономике ОМ:
  - подключения ОМ к системе сбора данных телескопа осуществ-

вляется через один глубоководный разъем с возможностью «мокрого» присоединения;

- обеспечена простота сборки ОМ и монтажа к несущему кабелю гирлянды телескопа;
  - минимизировано затемнение ОМ конструктивными элементами (рамой, бандажом, блоком электроники), что обеспечивает улучшение его угловых характеристик.
4. Оптический модуль является функционально законченным прибором, оснащенным системой управления режимами работы и контроля параметров, калибровочной системой (измерение задержки ОМ с точностью  $\sim 2$  нс и диапазона линейности до  $\sim 10^3$  фотоэлектронов), аппаратурой для мониторинга условий эксплуатации ОМ (измерение скорости счета до  $\sim 10^2$  кГц, рабочей температуры и высоковольтного напряжения на ФЭУ) и калибровки.
  5. Разработана методика и создано программное и аппаратное обеспечение для проверки, калибровки и паспортизации оптических модулей Baikal-GVD. Созданное программное обеспечение зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности. На стенд для исследования параметров сигналов светодиодов ОМ получен патент на полезную модель № 163505. Достигнуто выравнивание коэффициентов усиления канала лучше 10 %.
  6. Представленный в работе ОМ был детально изучен и охарактеризован. Были проведены измерения основных параметров ОМ: темновой скорости счета сигналов, формы импульсов в однофотозлектронном и многофотозлектронном режимах работы, временно-го разрешения, отклика на «большие» световые импульсы (работа в режиме «насыщения»), параметры послеимпульсов, угловой зависимости отклика ОМ.
  7. Проведены лабораторные испытания и паспортизация более 300 оптических модулей и создан архив данных параметров ОМ.
  8. Налажена процедура подготовки ОМ в условиях массового произ-

- водства. Подготовка ОМ включает в себя тестирование и паспортизацию отдельных компонентов ОМ (в т. ч. усилителя, делителя напряжений ФЭУ, контроллера ОМ, светодиодных калибровочных источников), температурные испытания блока электроники ОМ и набор проверочных процедур, позволяющих контролировать работоспособность ОМ на разных этапах его подготовки (после сборки, герметизации, транспортировки и монтажа на установке).
9. Подготовлены оптические модули для первого кластера Baikal-GVD. В настоящее время в состав кластера входит 288 ОМ.
  10. Проведены долговременные натурные испытания надежности оптических модулей. Суммарное время наработки ОМ составило  $\sim 400$  лет. Анализ работоспособности ОМ показал высокий уровень их надежности: среднее время наработки на отказ составило более 100 лет (в течение одного года эксплуатации количество вышедших из строя ОМ менее 1 %).
  11. Более чем годовая эксплуатация оптических модулей в составе первого кластера Baikal-GVD показала эффективность их работы в режиме регистрации мюонов и каскадных ливней, надежность работы калибровочной системы ОМ (точность временной калибровки составила  $\sim 2$  нс), достаточную информативность мониторинговой системы оптических модулей. В настоящее время по данным, полученным на системе мониторинга скорости счета фоновых сигналов ОМ, осуществляется анализ динамики глубинных течений в оз. Байкал.

#### Список публикаций по теме диссертации

1. The prototype string for the km<sup>3</sup>-scale Baikal neutrino telescope / V. Aynutdinov, A. Avrorin, V. Balkanov, ..., A. Shefler et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2009. — Vol. 602, Iss. 1. — P. 227–234.
2. Baikal neutrino telescope—An underwater laboratory for astroparticle physics and environmental studies / V. Aynutdinov, A. Avrorin, V. Balkanov,

- ..., A. Sheifler et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2009. — Vol. 598, Iss. 1. — P. 282-288.
3. Статус байкальского нейтринного эксперимента / Айнутдинов В.М., Аврорин А.В., Балканов В.А., ..., Шейфлер А.А. и др. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2009. — Т. 73. № 5. — С. 682-684.
  4. Экспериментальная гирлянда Байкальского нейтринного телескопа NT1000 / Аврорин А.В., Айнутдинов В.М., Белолапников И.А., ..., Шейфлер А.А. и др. // Приборы и техника эксперимента. — 2011. — № 5. — С. 55-65.
  5. Статус байкальского нейтринного эксперимента / Аврорин А.В., Айнутдинов В.М., Балканов В.А., ..., Шейфлер А.А. и др. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2011. — Т. 75. № 3. — С. 443-444.
  6. Оптический модуль Глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD / А.В. Аврорин, А.Д. Аврорин, В.М. Айнутдинов, ..., Шейфлер А.А. и др. // Письма в журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра». — 2016. — Т. 13, № 6. — С. 756-766.
  7. The optical module of Baikal-GVD / A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, ..., A.A. Sheifler et al. // EPJ Web of Conferences. — 2016. — Vol. 116. — P. 01003.
  8. The optical detection unit for Baikal-GVD neutrino telescope / A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V. M. Aynutdinov, ..., A.A. Sheifler et al. // EPJ Web of Conferences. — 2016. — Vol. 121. — P. 05008.

#### Список результатов интеллектуальной деятельности

3. Программа для калибровки ОМ нейтринного телескопа Baikal-GVD (SCOM): свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012618470; правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) (RU); автор: Шейфлер Алексей Александрович (RU); зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности 19 сентября 2012 г.

4. Стенд для исследования параметров сигналов светодиодов: патент на полезную модель № 163505; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт

ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) (RU); авторы: Ляшук Владимир Иванович (RU), Зуев Сергей Викторович (RU), Кулешов Денис Александрович (RU), Шейфлер Алексей Александрович (RU); заявка № 2015147431; приоритет полезной модели 05 ноября 2015 г.; зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 04 июля 2016 г., срок действия патента истекает 05 ноября 2025 г.

1. Шейфлер А.А. Оптический модуль нейтринного телескопа BAIKAL-GVD // Доклады Академии наук. — 2016. — Т. 489, № 10. — С. 1205-1208.

2. Шейфлер А.А., Александров А.В., Александров В.М., Байралиев И.А., ... Шейфлер А.А. // Доклады Академии наук. — 2016. — Т. 489, № 10. — С. 1209-1212.

3. Шейфлер А.А., Александров А.В., Александров В.М., Байралиев И.А., ... Шейфлер А.А. // Доклады Академии наук. — 2016. — Т. 489, № 10. — С. 1213-1216.

4. Шейфлер А.А., Александров А.В., Александров В.М., Байралиев И.А., ... Шейфлер А.А. // Доклады Академии наук. — 2016. — Т. 489, № 10. — С. 1217-1220.

5. Шейфлер А.А., Александров А.В., Александров В.М., Байралиев И.А., ... Шейфлер А.А. // Доклады Академии наук. — 2016. — Т. 489, № 10. — С. 1221-1224.

6. Шейфлер А.А., Александров А.В., Александров В.М., Байралиев И.А., ... Шейфлер А.А. // Доклады Академии наук. — 2016. — Т. 489, № 10. — С. 1225-1228.

7. Шейфлер А.А., Александров А.В., Александров В.М., Байралиев И.А., ... Шейфлер А.А. // Доклады Академии наук. — 2016. — Т. 489, № 10. — С. 1229-1232.

8. Шейфлер А.А., Александров А.В., Александров В.М., Байралиев И.А., ... Шейфлер А.А. // Доклады Академии наук. — 2016. — Т. 489, № 10. — С. 1233-1236.

Список литературы

1. Программа для калибровки ОМ нейтринного телескопа BAIKAL-GVD (SCOM): документация и пользовательский интерфейс программы для ОС Windows. — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, 2016. — 100 экз.

**Шейфлер  
Алексей Александрович  
Оптический модуль  
Байкальского глубоководного  
нейтринного телескопа BAIKAL-GVD  
(разработка и испытания регистрирующей системы)**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук на тему

Ф-т 60x84/16 Уч.-издл. 1,2 Зак. № 22398 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