

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Шейфлер Алексей Александрович

**ОПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ БАЙКАЛЬСКОГО ГЛУБОКОВОДНОГО НЕЙТРИННОГО
ТЕЛЕСКОПА ВАИКАЛ-GVD**

(разработка и испытания регистрирующей системы)

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физ. – мат. наук,
В. М. Айнутдинов

МОСКВА, 2016 г.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
Актуальность темы исследования	4
Цель работы и методы исследования	5
Научная новизна и практическая значимость	7
Личный вклад автора	7
Положения, выносимые на защиту	8
Апробация работы и публикации	8
Структура диссертации	10
ГЛАВА 1. ФОТОДЕТЕКТОРЫ НЕЙТРИННЫХ ТЕЛЕСКОПОВ	12
§ 1. Регистрация излучения Вавилова-Черенкова в естественных средах	12
§ 2. Характеристики излучения Вавилова-Черенкова	13
§ 3. Распространение черенковского излучения	15
§ 4. Световой фон при регистрации черенковского излучения	19
§ 5. Способы развертывания регистрирующей системы нейтринных телескопов	20
§ 6. Опыт проектирования оптические модулей для нейтринных телескопов	24
Проект НЕВОД	24
Проект AMANDA	24
Проект IceCube	25
Проект ANTARES	31
Проект NESTOR	33
Проект NEMO	35
Проект HT-200	36
Проект KM3Net	39
§ 7. Сравнительные характеристики оптических модулей	40
ГЛАВА 2. ТРЕБОВАНИЯ К ОМ ВАКАЛ-GVD	48
ГЛАВА 3. ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ	56
§ 1. Глубоководный корпус	56
Глубоководный разъём	60
Иммерсионный материал	62
Магнитный экран	64
Крепление ОМ на гирлянде	65
§ 2. Фотоэлектронный множитель	65
§ 3. Блок электроники ФЭУ	71
§ 4. Угловая зависимость отклика ОМ	81
§ 5. Основные характеристики ОМ Baikal-GVD	82
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ	84

\$ 1.	Стенд для исследований и паспортизации ОМ	84
\$ 2.	Исследование параметров ОМ	93
	Зависимость параметров ОМ от величины высоковольтного напряжения	95
	Характеристики ОМ в однофотоэлектронном режиме работы	98
	Зависимость параметров сигналов ОМ от уровня подсветки ФЭУ	106
	Послеимпульсы оптических модулей	111
	Характеристики системы калибровки и мониторинга параметров ОМ	117
	Выборочная проверка ФЭУ	120
\$ 3.	Основные результаты массовой проверки ОМ	122
ГЛАВА 5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ		125
ГЛАВА 6. НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ		134
\$ 1.	Мониторинг параметров ОМ	136
\$ 2.	Работа ОМ в режиме калибровки	139
\$ 3.	Регистрация мюонов	142
\$ 4.	Оценка надежности ОМ	144
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		147
СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА И ТАБЛИЦ		150
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ		156
СПИСОК ТЕРМИНОВ		157
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ		159

ВВЕДЕНИЕ

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) [1, 2], на котором впервые были зарегистрированы нейтрино астрофизической природы [3], ANTARES (Франция) [4] и KM3Net (проект, объединяющий нейтринные телескопы Средиземного моря) [5, 6].

В настоящее время в оз. Байкал на базе установки НТ–200 [7–10] создается глубоководный нейтринный телескоп масштаба кубического километра Baikal-GVD (НТ1000) [11–14]. 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 $\sim 1,5$ км, обеспечивать возможность управления и мониторинга параметров ОМ и проведения амплитудной и временной калибровки каналов установки. Конструкция ОМ должна быть оптимизирована для оперативного 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.

Разработка оптического модуля основана на результатах модельных расчетов, лабораторных исследований и натурных испытаний в оз. Байкал. В качестве основы для конструирования ОМ был использован оптический модуль “Квазар” [15, 16], разработанный для байкальского эксперимента (детектор НТ–200) в 90-х годах прошлого века (конструкция глубоководного корпуса, принцип монтажа фотоэлектронного умножителя в корпус, система крепления ОМ при монтаже установки). В то же время развитие электронной промышленности за последние два десятилетия обеспечило возможность существенно усовершенствовать системы регистрации, управления, мониторинга, передачи данных и калибровки ОМ.

Можно выделить три этапа выполнения работы по разработке и созданию оптического модуля Baikal-GVD. На первом этапе (2007 – 2011 гг.) были проведены исследования фотоприемников разных типов и разработан блок электроники ОМ. В качестве фотоприемников для Baikal-GVD были выбраны фотоэлектронные умножители (ФЭУ) R7081-100, производимые фирмой HAMAMATSU [17], с полусферическим фотокатодом диаметром 10” и квантовой эффективностью на уровне 35 %.

На втором этапе работы (2012 – 2014 гг.) проводились комплексные лабораторные исследования характеристик оптических модулей и их натурные испытания в оз. Байкал. Исследовались амплитудные и временные параметры ОМ как в линейном режиме работы ФЭУ, так и в условиях насыщения, шумовые характеристики (в том числе послеимпульсы), угловые характеристики отклика оптического модуля, влияние магнитного поля на работу фотоэлектронного умножителя. Для измерения характеристик блока электроники оптических модулей и ОМ в целом были подготовлены испытательные стенды и создано программное обеспечение, позволяющее проводить измерения в автоматическом режиме. В указанный период времени было подготовлено в общей сложности 120 оптических модулей, которые были установлены для натурных испытаний в оз. Байкал в составе первой очереди кластера Baikal-GVD (одна гирлянда с 24 ОМ в 2012 году, две гирлянды в 2013 и две в 2014). Испытания ОМ проводились во всех основных режимах работы глубоководной установки: экспозиции в потоке атмосферных мюонов, калибровки при помощи светодиодного источника света, мониторинга параметров оптических модулей. Результаты проведенных испытаний продемонстрировали корректность функционирования основных узлов ОМ и соответствие их параметров требованиям, предъявляемым к регистрирующей системе нейтринного телескопа.

На третьем этапе работы (2015 – 2016 гг.) производилась массовая подготовка ОМ, включающая в себя проверку, калибровку и температурные испытания блоков электроники, сборку оптических модулей, их тестирование на лабораторных стендах и формирование базы данных параметров ОМ. В общей сложности было подготовлено более 300 оптических

модулей, 288 из которых в настоящее время установлено и успешно функционирует в составе первого кластера Baikal-GVD, введенного в эксплуатацию в оз. Байкал в апреле 2016 года.

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 ~ 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 ~ 400 лет).

Апробация работы и публикации

Результаты исследования были представлены на рабочих совещаниях сотрудничества «Байкал» (2008 – 2016 гг.) и следующих конференциях:

- The prototype string for the km³-scale baikal neutrino telescope / V. Aynutdinov, A. Avrorin, V. Balkanov, ..., A. A. Sheifler et al. // the Proceedings of Roma International Conference on Astro-Particle Physics. — Roma, 2007. — 20-22 June.
- The optical detection unit for Baikal-GVD neutrino telescope / A. D. Avrorin, A. V. Avrorin, V. M. Aynutdinov, ..., A. A. Sheifler et al. // RICAP-2014. — Noto, 2014. — 30 – 3 Oct. <https://agenda.infn.it/conferenceDisplay.py?confId=7620>
- The optical module of the Baikal-GVD neutrino telescope / A. D. Avrorin, A. V. Avrorin, V. M. Aynutdinov, ..., A. A. Sheifler et al. // the 34th International Cosmic Ray Conference. — Hague, 2015. — 30 July-6 August. http://pos.sissa.it/archive/conferences/236/1163/ICRC2015_1163.pdf
- Time and amplitude calibration of the Baikal-GVD neutrino telescope / A. D. Avrorin, A. V. Avrorin, V. M. Aynutdinov, ..., A. A. Sheifler et al. // the 34th International Cosmic

Ray Conference. — Hague, 2015. — 30 July-6 August.
http://pos.sissa.it/archive/conferences/236/1162/ICRC2015_1162.pdf

- The optical module of Baikal-GVD / A. D. Avrorin, A. V. Avrorin, V. M. Aynutdinov, ..., A. A. Sheifler et al. // Very Large Volume Neutrino Telescope. — Rome, 2015. — 14 – 16 Sep. <https://indico.cern.ch/event/378423/>

Непосредственно по результатам диссертации опубликованы следующие статьи:

1. The prototype string for the km³-scale Baikal neutrino telescope / 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. 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 НТ1000 / Аврорин А.В., Айнутдинов В.М., Белолоптиков 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.

Непосредственно по результатам диссертации зарегистрированы следующие результаты интеллектуальной деятельности:

- 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.
- 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.

Структура диссертации

В первой главе рассматриваются различные типы фотодетекторов, разработанных для нейтринных телескопов, и обсуждается влияние условий эксплуатации на выбор их основных характеристик.

Глава вторая формирует требования к техническим и конструктивным параметрам оптического модуля Baikal-GVD с учетом особенностей места расположения телескопа, параметров водной среды, методикой развертывания детектора и принципом организации системы сбора данных установки.

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

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

В пятой главе дана оценка необходимой надежности ОМ и описан процесс подготовки оптических модулей в условиях их массового производства, обеспечивающей требуемый уровень надежности.

В шестой главе представлены выборочные результаты натурных 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.

В заключении представлены основные результаты выполненной работы.

Глава 1. Фотодетекторы нейтринных телескопов

Методика исследований природных потоков нейтрино высоких и сверхвысоких энергий в экспериментах на глубоководных (подледных) нейтринных телескопах основана на регистрации излучения Вавилова–Черенкова мюонов либо электромагнитных или адронных ливней образующихся в нейтринных взаимодействиях пространственной решеткой фотодетекторов размещенных на достаточно больших расстояниях (до десятков метров) друг от друга.

Выбор оптимальных технических характеристик фотодетекторов и их конструкции зависит от конкретных условий развертывания и эксплуатации нейтринного телескопа:

- характеристик светового излучения, генерируемого заряженными частицами в среде;
- характеристик среды, в которой осуществляется регистрация излучения (поглощение и рассеяния света);
- уровня светового фона в районе установки;
- способа монтажа аппаратуры;
- возможности проведения профилактических и ремонтных мероприятий на установке.

В данной главе рассматриваются различные типы фотодетекторов, разработанных для нейтринных телескопов, и обсуждается влияние условий эксплуатации на выбор их основных характеристик. В тексте будет использоваться общепринятое название для фотодетекторов нейтринных телескопов: оптические модули (ОМ).

§ 1. *Регистрация излучения Вавилова-Черенкова в естественных средах*

При разработке аппаратуры для регистрации нейтрино по излучению Вавилова–Черенкова продуктов из взаимодействия следует учитывать как характеристики самого излучения Вавилова–Черенкова от мюонов и каскадных ливней, так и условия распространения излучения в рабочем объеме установки. Характеристики генерации и распространения излучения в среде определяют эффективную площадь и эффективный объем детектора при регистрации мюонов и каскадных ливней, точность восстановления геометрических параметров событий (координат точки взаимодействия и направления движения нейтрино). Кроме того,

наряду с фоновыми характеристиками среды (интенсивностью собственного свечения), они оказывают значительное влияние на надежность классификации событий, регистрируемых нейтринным телескопом.

§ 2. Характеристики излучения Вавилова-Черенкова

Заряженная частица, движущаяся в преломляющей свет среде со скоростью, превышающей скорость света в среде, является источником излучения Вавилова–Черенкова [18, 19]. Спектральное распределение черенковских фотонов, излучаемых с единицы длины траектории частицы с единичным зарядом, определяется следующим выражением:

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

где λ – длина волны фотона в сантиметрах, $\alpha \approx \frac{1}{137}$ – постоянная тонкой структуры, $n(\lambda)$ – фазовый показатель преломления света в среде, $\beta = v/c$ – скорость частицы относительно скорости света в вакууме. Важным свойством процесса излучения Вавилова–Черенкова, которое во многом определяет эффективность глубоководного метода регистрации частиц, является испускание фотонов в каждый момент времени из точки на траектории, в которой находится частица, строго под фиксированным углом θ_c относительно направления движения частицы. Значение черенковского угла θ_c определяемого из выражения $\cos \theta_c = 1/(\beta n)$ составляет примерно 42° для воды и льда. Абсолютное значение скорости черенковских фотонов $v_c(\lambda)$ определяется групповой скоростью распространения света соответствующей длины волны в среде:

$$v_c = \frac{c}{n_g(\lambda)}, n_g(\lambda) = n(\lambda) - \lambda \frac{dn}{d\lambda}. \quad (1-2)$$

Рабочим диапазоном длин волн фотонов, детектируемых в глубоководных экспериментах, является интервал от 350 до 600 нм. Нижняя граница этого интервала обусловлена поглощением света стеклом фотодетекторов, а верхняя – увеличением показателя поглощения света в воде и во льду, а также уменьшением интенсивности излучения Вавилова–Черенкова и понижением квантовой чувствительности электронных фотоумножителей с ростом длины волны фотонов в красной области спектра. Групповая скорость распространения света в воде и во льду растет с ростом длины волны фотонов, что приводит к размытию светового сигнала излучения Вавилова–Черенкова во времени.

Мюоны и ливни высоких энергий с энергией от сотен ГэВ и выше представляют собой два разных типа источников излучения Вавилова–Черенкова, регистрируемых в нейтринных

телескопах. Световой поток, испускаемый при прохождении мюона в среде, включает в себя черенковское излучение, инициируемое электрическим зарядом мюона, а также, черенковское излучение δ -электронов, рождающихся при ионизации атомов среды мюоном, и черенковское излучение ливней, образующихся в результате рождения e^+e^- пар, либо тормозного и фото-ядерного взаимодействий мюона со средой. Таким образом, световое поле, инициируемое мюоном в среде, можно разделить на две составляющие. Первая составляющая излучается непрерывно с постоянной линейной плотностью из выражения ((1-1) по мере движения мюона вдоль его траектории. Линейная плотность и угловое распределение фотонов в этом источнике обусловлены черенковскими фотонами собственно мюона. Вторая составляющая формируется локальными (в грубом приближении, точечными) источниками на траектории мюона и описывает черенковское излучение ливней, образующихся в результате рождения e^+e^- пар, а также, в результате тормозного и фото-ядерного взаимодействий мюона.

Ливни высоких энергий образуются при взаимодействиях нейтрино с нуклонами в реакциях:

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + N \xrightarrow{CC} l^-(l^+) + \text{адроны}, \quad \nu_l(\bar{\nu}_l) + N \xrightarrow{NC} \nu_l(\bar{\nu}_l) + \text{адроны},$$

где $l = e, \mu$ или τ , а также при резонансном рассеянии электронного антинейтрино на электроны. Черенковское излучение электромагнитных и адронных ливней формируется фотонами, испущенными заряженными частицами ливня (в основном, электронами и позитронами) и определяется их пространственным, угловым и временным распределением. Поперечный размер электромагнитного ливня характеризуется Мальеровским радиусом (для воды около 9 см) и практически не влияет на отклик фотодетекторов нейтринных телескопов. Угловое распределение электронной компоненты ливня слабо меняется вдоль оси ливня в окрестности максимума каскадной кривой, из которой излучается подавляющая доля черенковских фотонов, и для ливней с энергией выше 100 ГэВ может быть описано с удовлетворительной точностью единой функцией $\Psi_e(\theta)$, не зависящей от пространственных координат. Таким образом, распределение электронной компоненты ливня может быть представлено в следующем виде:

$$N_e(x, \rho, \theta, t) \cong N_e(x)\Psi_e(\theta)\delta(t - x/c), \quad (1-3)$$

где c – скорость света в вакууме.

Число черенковских фотонов $N_c(x, \theta, t)dx d\vec{\Omega} dt$, испущенных с интервала длины dx в окрестности x в элементе телесного угла $d\vec{\Omega}$, пропорционально суммарной длине траекторий заряженных частиц dl_e на интервале dx . Так как подавляющая доля частиц ливня движется вдоль его оси, то $dl_e \approx N_e(x)dx$. Относительное угловое распределение черенковских фотонов, просуммированное по траекториям всех заряженных частиц ливня $\Psi_c(\theta)$ [20] при $E_{sh} > 100$ ГэВ

практически не зависит от энергии ливня (см. рисунок 1-1). Угловые распределения черенковских фотонов, испущенных с разных участков оси ливня в окрестности максимума каскадной кривой, незначительно отличаются от суммарного распределения $\Psi_c(\theta)$ [21], что позволяет разделить угловые и пространственные переменные и представить N_c в следующем виде:

$$N_c(x, \theta, t) \cong N_e(x)n_c\Psi_c(\theta)\delta(t - x/c), \quad (1-4)$$

где n_c – линейная плотность черенковского излучения релятивистских частиц (для воды и льда $n_c \approx 230 - 240$ фотонов/см в интервале длин волн 350 – 600 нм).

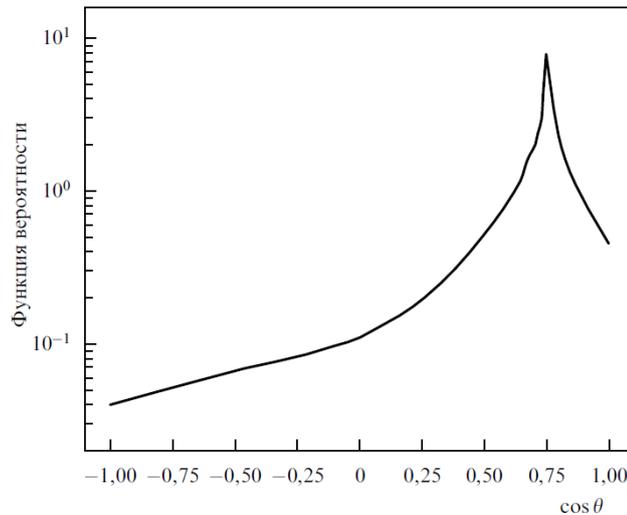


Рисунок 1-1 – угловое распределение черенковского излучения от электромагнитных ливней высоких энергий

Полное число черенковских фотонов от электромагнитного или адронного ливня пропорционально суммарной длине траекторий заряженных частиц и, соответственно, энергии ливня:

$$N_c^{tot} = n_c L_c = BE_{sh}(\text{ГэВ}). \quad (1-5)$$

Для электромагнитного ливня коэффициент пропорциональности $B \sim 10^5$ фотонов/ГэВ.

§ 3. Распространение черенковского излучения

Основными оптическими параметрами среды, определяющими распространение черенковского излучения мюонов и ливней в естественных средах, являются показатель поглощения $k(\lambda)$, показатель рассеяния $\sigma(\lambda)$ и индикатриса рассеяния $\chi(\mu, \lambda)$ ($\mu = \cos \vartheta$, ϑ – угол рассеяния фотона). Рисунок 1-2 (а, б) показывает характерные спектральные зависимости

оптических параметров среды в местах проведения глубоководных экспериментов на оз. Байкал, на Южном Полюсе в Антарктиде и в Средиземном море.

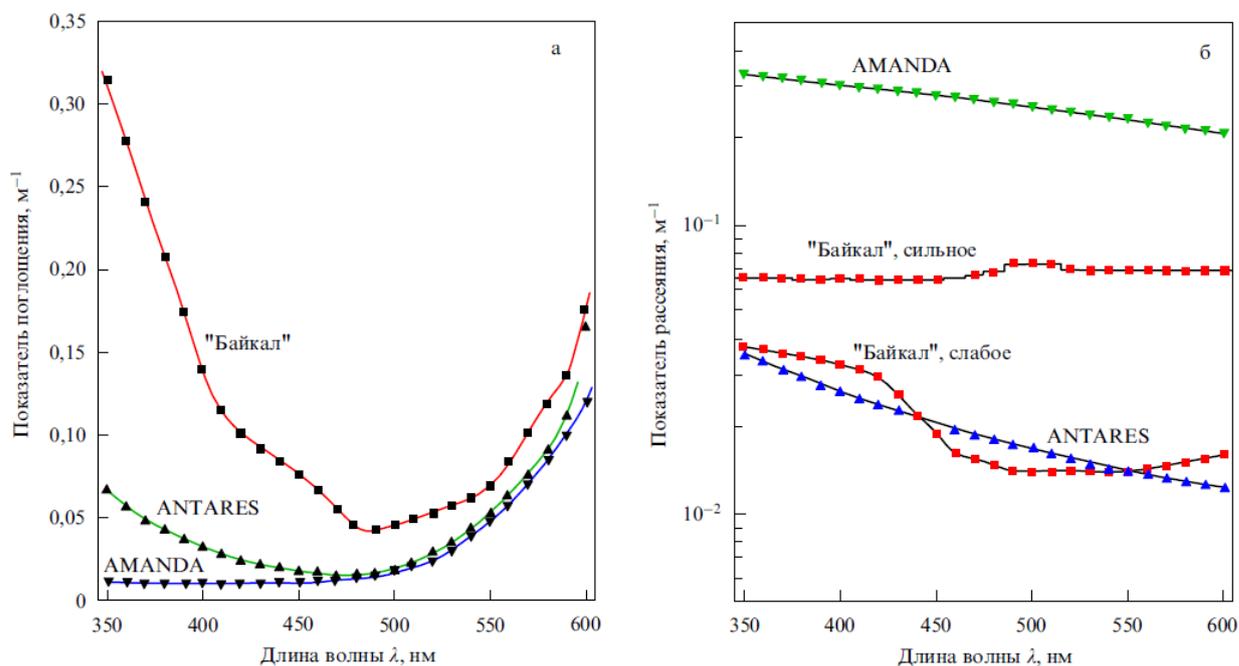


Рисунок 1-2 – спектральная зависимость показателей поглощения (а) и рассеяния (б) байкальской воды, антарктического льда (AMANDA) и воды Средиземного моря (ANTARES) [19]

Главной особенностью льда, как среды регистрации излучения Вавилова-Черенкова, является малая длина рассеяния, которая нивелирует преимущество большей прозрачности льда (большой длины поглощения) [22]. Так, для характерных длин поглощения льда 100 м и рассеяния 3 м на расстояниях 250 м поток фотонов во льду становится ниже, чем в морской воде, где длина поглощения и рассеяния одинаковы и составляют ~ 50 м. Во льду уже на расстояниях 10 м в основном регистрируются рассеянные фотоны (диффузная среда). На расстояниях более 20 м угловое распределение фотонов от точечного ливня становится квази-изотропным и отклик ОМ ориентированного на ливень и от ливня отличаются всего в 2 – 3 раза. Отсутствие угловой направленности излучения, уширение временного распределения регистрируемых фотонов из-за рассеяния света и сдвиг пика распределения в сторону больших временных задержек ухудшают качество восстановления координат и направления источника излучения. С другой стороны диффузия фотонов во льду приводит к большему количеству сработавших ОМ, что даёт определенные преимущества при восстановлении энергии источника.

Другой особенностью льда, как среды распространения излучения, является наличие слоистой структуры с разными показателями поглощения и рассеяния [23, 24]. Характеристики слоев зависят от концентрации минеральных отложений пыли, которая, в свою очередь, коррелирует с климатологической историей. Самая высокая концентрация пыли на глубине

между 2000 и 2100 м соответствует последнему ледниковому периоду (~ 65000 лет назад). Слой льда на глубинах более 2100 м приблизительно на 40 – 50 % чище, чем лед между 1500 и 2000 м. В чистом льду, на глубине ~ 2400 м, для длины волны 400 нм средняя эффективная длина рассеяния близка к 50 м и средняя длина поглощения близка к 190 м. Дополнительное рассеяние света связано с технологией монтажа оптических модулей. ОМ замораживаются в скважинах наполненных водой, что приводит к образованию пузырьков, которые диффундируют вверх и скапливаются на поверхности модулей и затем рассеивают свет.

Большое рассеяние света является существенным недостатком льда, как регистрирующей среды нейтринного телескопа. В то же время лед имеет и ряд преимуществ: отсутствие выпадения и накоплением осадков на ОМ увеличивает эффективность регистрации излучения, приходящего из верхней полусферы; отсутствие течений приводит к стабильному положению ОМ в установке (отсутствуют перемещения ОМ друг относительно друга); низкая температура (от -40 до -20 °С – чем глубже, тем теплее) и отсутствие собственного свечения льда обеспечивают низкий уровень фоновых срабатываний фотодетекторов (менее 500 Гц). Такой уровень шумов сопоставим с частотой радиоактивных распадов в стекле колбы ФЭУ и корпуса ОМ.

Для водной среды коэффициенты поглощения и рассеяния по порядку величины совпадают. Оптические свойства глубинных вод Средиземного моря характеризуются длиной поглощения 40 – 70 м и длиной рассеяния порядка 30 – 60 м. Для глубинных вод оз. Байкал характерными являются длина поглощения 22 – 25 м и длина рассеяния 30 – 50 м. Величина длины рассеяния света в байкальской и средиземноморской воде более чем на порядок превышает соответствующую величину в антарктическом льду. Дополнительными факторами, влияющими на регистрацию излучения в воде, являются спектральные зависимости скорости света, показателя поглощения и рассеяния, что приводит к “размытию” светового сигнала от заряженных частиц. Для байкальской воды, где показатель поглощения имеет минимум в области 480 – 500 нм, уширение временного отклика, вызванное этим эффектом, не превышает 1,5 – 2 нс. Для Средиземного моря с более равномерным спектральным распределением показателя поглощения, уширение временного отклика может достигать 3 – 5 нс. Рисунок 1-3 показывает расчетное временное распределение отклика ОМ для различных сред [22].

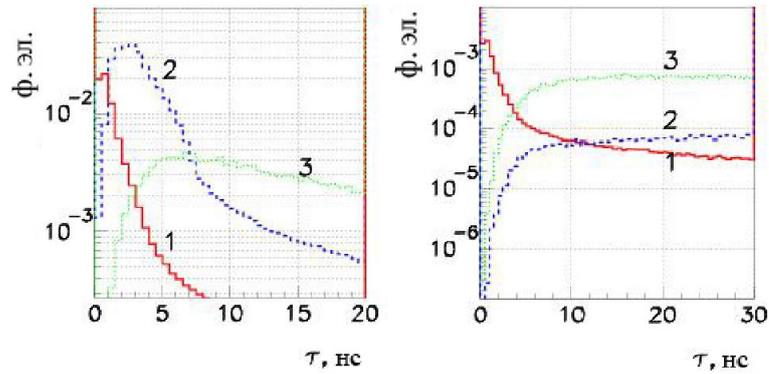


Рисунок 1-3 – расчетное временное распределение отклика ОМ на расстоянии от траектории мюона 25 м и направлении ОМ против движения мюона и по движению мюона (1 – байкальская вода, 2 – средиземноморская вода, 3 – антарктический лёд) [22]

В воде регистрируются, главным образом, прямые (нерассеянные) фотоны, что дает лучшее временное разрешение, и, как следствие, лучшее восстановление координат источника излучения. Например, для байкальской воды рассеяние слабо влияет на ширину временного распределения на расстояниях вплоть до 60 м от траектории мюона. Для ливней ширина временного распределения составляет 4 – 12 нс в зависимости от расстояния от ливня. Влияние рассеяния начинает сказываться на расстояниях более 100 м, приводя к уширению временного распределения регистрируемых сигналов. Рисунок 1-4 показывает временные распределения сигналов от точечного ливня [22] на различных расстояниях от источника.

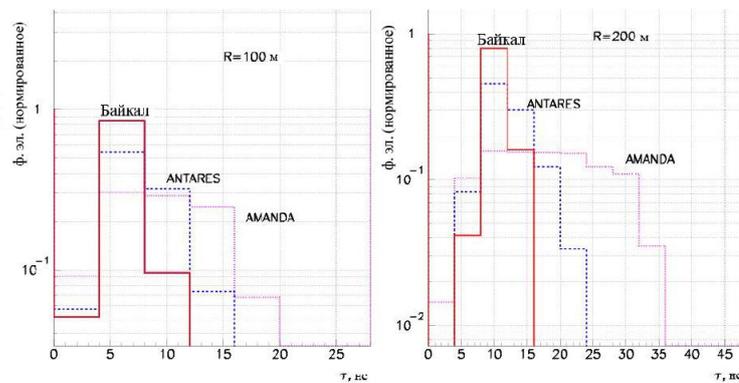


Рисунок 1-4 – приведенные временные распределения откликов ОМ в разных средах на расстоянии 100 м (слева) и 200 м (справа) от ливня [22]

На рисунках 1-5 и 1-6 представлено угловое распределение фотонов от ливня для байкальской воды и льда [22]. В случае льда существенное размытие пика излучения наблюдается на расстояниях > 20 м, а ширина светового импульса на расстояниях ~ 200 м составляет величину ~ 1 мкс. Слабое рассеяние фотонов в воде приводит к тому, что пространственное распределение фотонов на фиксированном расстоянии от ливня имеет характерным максимум, соответствующий угловому распределению черенковского излучения

ливня. Это позволяет восстанавливать направление прихода нейтрино, инициировавшего ливень в телескопе с существенно большей точностью по отношению ко льду. В зависимости от энергии ливня, удаленности и ориентации ОМ относительно ливня длительность сигнала от ливня в водной среде может меняться от ~ 10 до ~ 100 нс.

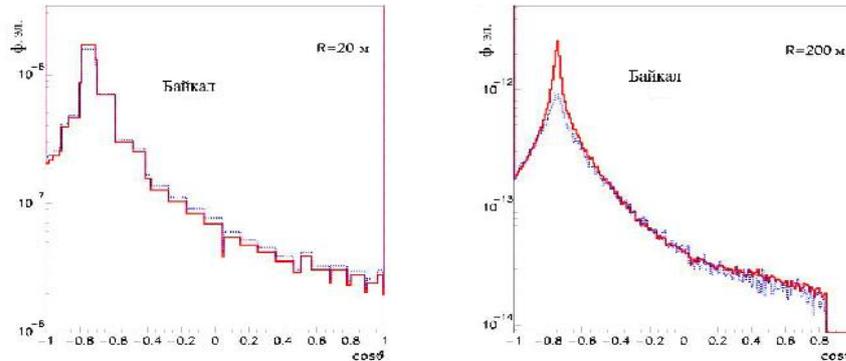


Рисунок 1-5 – отклик сферического ОМ на расстоянии 20 и 200 м (БАЙКАЛ). Сплошная и пунктирная кривые относятся, соответственно, к случаям без учета и с учетом рассеяния [22]

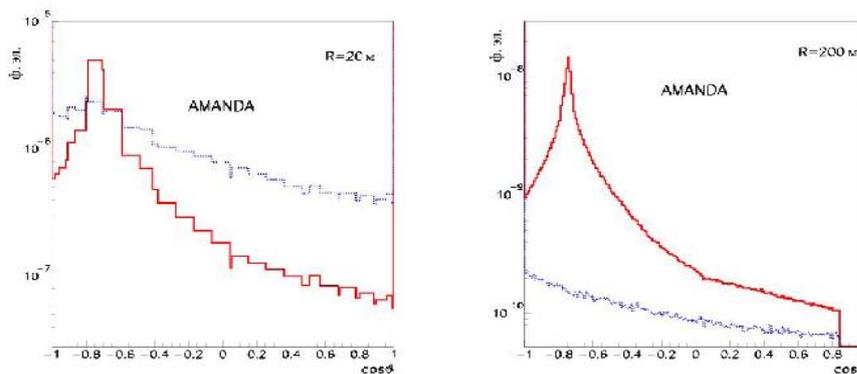


Рисунок 1-6 – отклик сферического ОМ на расстоянии 20 и 200 м (AMANDA). Сплошная и пунктирная кривые относятся, соответственно, к случаям без учета и с учетом рассеяния [22]

§ 4. Световой фон при регистрации черенковского излучения

Для нейтринных телескопов, использующих для регистрации лед, фон, вызванный свечением среды, практически отсутствует. Шумы канала определяются главным образом темновым током фотодетектора и составляют величину около 500 Гц. Такая низкая шумовая скорость счета срабатываний ФЭУ связана с их эксплуатацией при низких температурах -20 – -40 °С.

Источниками фона в воде Средиземного моря являются биолюминесценция и распады ^{40}K . Оптический фон от распада ^{40}K составляет $40 - 80$ кГц/ОМ на однофотозлектронном уровне порога. Наблюдаются всплески интенсивности свечения длительностью в несколько секунд, связанные с биолюминесценцией. В период всплеска интенсивности оптический фон

может достигать значений в сотни кГц. Показано, что интенсивность биолюминисцентного свечения коррелирует со скоростью течений в районе установки. Это связано с тем, что глубоководные модули, обтекаемые водой, являются “возбудителями” живых организмов, которые генерируют вспышки биолюминисценции [25].

В байкальской воде отсутствует ^{40}K и не обнаружена биолюминесценция. Источником фонового свечения является хемилюминесценция – свечение продуктов распада мертвых организмов. Характерная величина шумов канала составляет ~ 25 кГц. Из-за переноса конгломератов светящейся массы течениями оз. Байкал наблюдаются значительные временные вариации фонового свечения. Кроме того, свечение байкальской воды подвержено значительным сезонным вариациям.

В таблице 1-1 представлены характеристики среды (поглощение, рассеяние, световой фон) в местах размещения нейтринных телескопов: оз. Байкал, Средиземное море, Антарктида.

Таблица 1-1 – характеристики среды в местах размещения нейтринных телескопов

Характеристика	Оз. Байкал	Средиземное море	Антарктида
Длина поглощения	22 м	55 м	100 м
Длина рассеяния	30 – 50 м	55 м	3 м
Структура среды	Однородная	Однородная	Слоистая
Скорость счета шумов	20 – 60 кГц хемилюминесценция	60 – 250 кГц ^{40}K , биолюминесценция	< 1 кГц Темновой ток ФЭУ

§ 5. Способы развертывания регистрирующей системы нейтринных телескопов

Способы размещения оптических модулей в установке в значительной степени зависят от места дислокации нейтринного телескопа. Можно выделить три основных типа размещения ОМ (см. рисунок 1-7): одиночные ОМ, расположенные на вертикальном несущем тросе (AMANDA, IceCube, KM3Net); ОМ, установленные группами вдоль несущего троса (ANTARES, NT-200); ОМ, расположенные на специальных дополнительных конструкциях – “этажах” (NEMO, NESTOR). Группами ОМ располагают главным образом для включения в схемы совпадения для подавления фонового свечения. В антарктических экспериментах ОМ располагаются по одному. Это связано как с методикой развертывания детектора (установка ОМ в скважины во льду с последующим замораживанием окружающей их воды), так и низким уровнем их шумовых срабатываний. В водных экспериментах в Средиземном море, в условиях высокого уровня шумовых срабатываний, ОМ располагаются либо группами и включаются в

схемы совпадений, либо располагаются по одному, но при этом используются совпадения ФЭУ внутри модуля (ОМ с 31 ФЭУ проекта KM3Net).

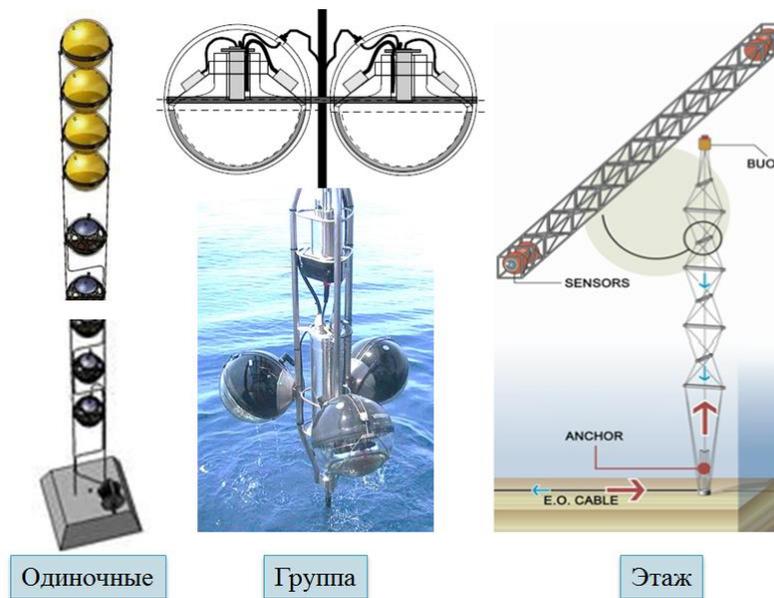


Рисунок 1-7 – способы установки ОМ нейтринных телескопов: KM3Net (слева), NT-200 и ANTARES (в центре), NESTOR (справа)

Уровень собственного свечения байкальской воды существенно ниже, чем в Средиземном море. Поэтому в условиях работы в оз. Байкал возможны разные подходы для размещения ОМ. Для Байкальского проекта NT-200 был сделан выбор в пользу установки ОМ парами. Это было связано, главным образом, с ограничениями на пропускную способность линий передачи данных установки и, следовательно, необходимостью снижения скорости счета формирования триггера установки. Совпадения снижают среднюю скорость счета пары ОМ до величины $\sim 10^2$ Гц. Недостатками такого подхода являются увеличение количества ОМ в установке для заданного инструментального объема, повышение эффективного порога (требование срабатывание двух ОМ в паре) и некоторое взаимное затенение ОМ друг другом.

Следует упомянуть и о методах развертывания нейтринных телескопов в целом, поскольку это оказывает влияние на способы подсоединения кабельных коммуникаций к ОМ и их ремонтпригодности. Для антарктических экспериментов гирлянды ОМ устанавливаются в скважинах (см. рисунок 1-8), которые “бурятся” при помощи горячей воды ~ 90 °С под высоким давлением. Средний диаметр отверстия ~ 50 см по всей глубине с незначительными изменениями, связанными с температурным профилем льда. Развертывание гирлянды производится сразу после окончания бурения и до того, как диаметр отверстия начинает сжиматься из-за обмораживания. Каждый ОМ подключается к несущему кабелю и испытывается “на месте” во время развертывания. Монтаж ОМ на кабель непосредственно в процессе развертывания требует использования разъемных кабельных соединителей

(глубоководных разъемов). Модули антарктических экспериментов не пригодны для последующего ремонта, т. к. демонтировать их после установки невозможно.



Рисунок 1-8 – скважина для развертывания гирлянды ОМ в Антарктиде

В средиземноморских проектах гирлянды с оптическими модулями обычно полностью собираются в лаборатории и затем ставятся на дно со специализированных судов или плавучих платформ, формируя глубоководные “станции” детектора. Подключение станций оптических модулей к глубоководному кабелю происходит при помощи телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов. Аппаратура станций монтируется в лаборатории в виде конструкций, оптимизированных для погружения с водных платформ.

В эксперименте KM3Net оптические модули монтируются на одной гирлянде, которая собирается в виде сферической компактной сборки. После погружения под воду и установки на дно сборка ОМ разворачивается, формируя гирлянду (см. рисунок 1-9).

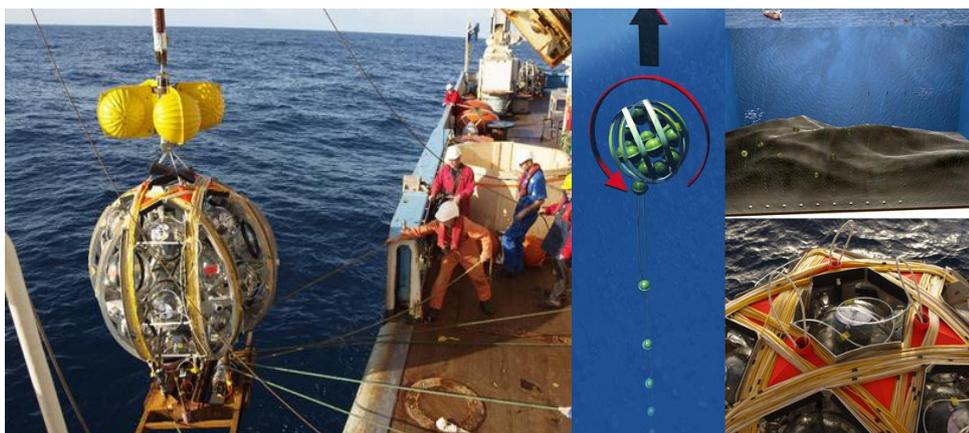


Рисунок 1-9 – методика развертывания гирлянды KM3Net в Средиземном море

В эксперименте NESTOR от центрального модуля станции отходят шесть титановых труб (“плеч”), формируя легкую и жесткую структуру балок – “этаж”. В общей сложности на каждом этаже устанавливается 14 ОМ, часть из которых ориентированы фотокатодами в верхнем направлении. Использование “вверх смотрящих” ОМ позволяет регистрировать

излучение со всех направлений и улучшает эффективность выделения частиц из нижней полусферы. Однако, осаждение осадков на ОМ с фотокатодами, направленными вверх, со временем существенно снижает эффективность их использования.

Сборка станций ОМ в лаборатории позволяет использовать для подключения оптических модулей как глубоководные разъемы, так и проходники – герметичные неразъемные соединители кабельных линий. Применение проходников особенно эффективно при использовании оптоволоконной системы передачи информации от ОМ, поскольку глубоководные оптические разъемы для нейтринных телескопов в настоящее время находятся только на стадии разработки. В этих условиях при необходимости демонтажа какого-либо модуля, производится демонтаж всей гирлянды.

Для Байкальского эксперимента проблема развертывания решается существенно проще, чем для антарктических и средиземноморских проектов: при монтаже используется естественное ледяное покрытие оз. Байкал – лед. Байкальский лед обладает достаточной прочностью для проведения монтажных работ в течение ~ 2 месяцев в году в период с февраля по апрель. Прокладка кабелей также осуществляется с ледяного покрова озера. Все глубоководные кабели идут от берега до телескопа по дну и возле телескопа поднимаются до поверхности и затем опускаются до телескопа, что позволяет в случае необходимости поднимать гирлянды. Это обеспечивает возможность ремонта отдельных узлов установки. Стоит отметить, что при монтаже (демонтаже) не требуется дорогостоящее оборудование и техника: суда и подводные аппараты. Монтаж гирлянд осуществляется при помощи специализированных лебёдок (см. рисунок 1-10).

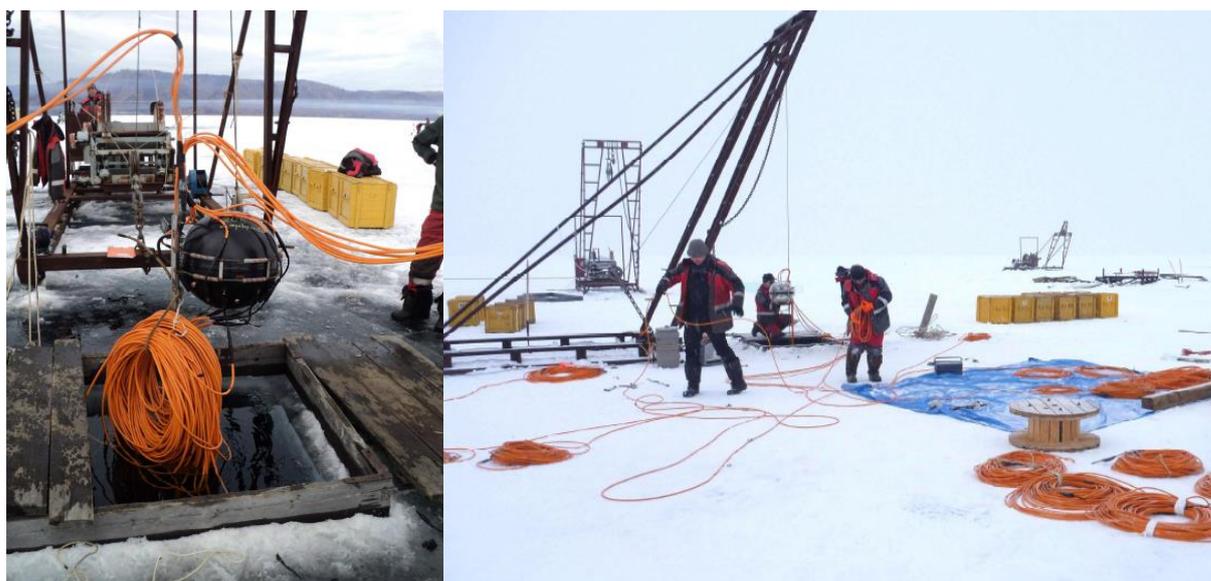


Рисунок 1-10 – методика развертывания гирлянд ОМ Байкальского нейтринного телескопа при помощи лебёдок

§ 6. Опыт проектирования оптические модулей для нейтринных телескопов

Первые ОМ для глубоководного нейтринного телескопа были разработаны в проекте DUMAND на базе ФЭУ НАМАМАТСУ R2018 с полусферическим фотокатодом диаметром 15" [26]. Работа над проектом велась примерно с 1976 г. Корпусами гидрозащиты служили сферы из боросиликатного стекла диаметром 17", выпускаемые фирмой BENTOS. ФЭУ клеивался в сферу силиконовым гелем Semicosil®912, Wacker, Германия, который одновременно служил иммерсионным материалом.

Проект НЕВОД

Проект НЕВОД [27] берёт своё начало в 1977 году. В этой установке для обеспечения регистрации событий с любого направления используется детектирующая система в виде пространственной решетки, в узлах которой расположены квазисферические модули (КСМ) [28] (рисунок 1-11). Модули объединены в гирлянды по 3 – 4 КСМ в каждой. Каждый КСМ содержит шесть ФЭУ-200 с плоским фотокатодом, ориентированных вдоль осей ортогональной системы координат. Такой модуль обладает свойством квазисферичности, так как сумма квадратов амплитуд откликов ФЭУ не зависит от углов падения черенковского излучения на фотокатоды. Пространственная решетка на базе КСМ позволяет восстанавливать параметры излучающих треков в телесном угле 4π на основе только амплитудного анализа. Массив модулей находится в резервуаре воды на поверхности Земли.



Рисунок 1-11 – квазисферический модуль (слева) и гирлянда модулей (справа) установки НЕВОД

Проект AMANDA

Окончательная конфигурация детектора, называемая Аманда-II, была развернута в четыре этапа в период с ноября 1995 г. по февраль 2000 г. на станции Амундсен – Скотт, Южный полюс [29]. Детектор состоит из 677 ОМ, расположенных на 19 вертикальных гирляндах, развернутых на глубинах 1300 – 2400 м в чистом, арктическом льду ниже Южнополярной станции. В каждом ОМ вклеен ФЭУ при помощи оптического геля, который

обеспечивает крепление ФЭУ и оптический контакт между стеклянной сферой и фотокатодом. Гель и стекло пропускают свет с длиной волны больше 350 нм. Стеклянная сфера способна выдерживать давление до 70 МПа (650 бар в течение 7 дней во время замораживания и 250 бар после замораживания) и имеет внешний диаметр меньше 15". Каждый ОМ AMANDA содержит минимальный набор электроники. Аналоговый сигнал с анода 8" ФЭУ HAMAMATSU R5912-2 передаётся на поверхность по кабелю длиной ~ 2 км, по которому также передается и высоковольтное напряжение ФЭУ. Завершенный детектор AMANDA представляет собой эволюцию технологий передачи сигнала от коаксиального кабеля к медной витой паре, и затем к оптическому волокну [30, 31]. Общая точность определения времени прибытия фотона составила 5 – 7 нс [32].

На рисунке 1-12 представлена схема (слева) и фотография (справа) ОМ AMANDA.

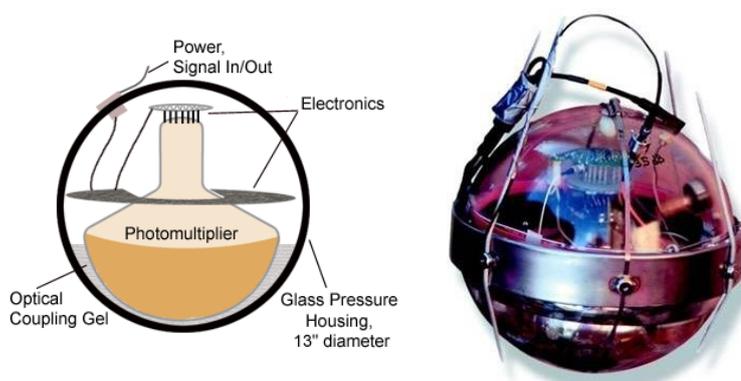


Рисунок 1-12 – схема (слева) [33] и фотография (справа) [34] оптического модуля проекта AMANDA

Основные характеристики ФЭУ HAMAMATSU R7081-02 ОМ AMANDA:

- диаметр: 20 см;
- площадь фотокатода: 324 см²;
- квантовая эффективность: 25 %;
- разброс времени пролета: 2,8 нс;
- количество динодов: 14;
- пик/долина: 1,5 – 2,5;
- усиление: $1 \cdot 10^9$ на 1700 В.

Проект IceCube

Большие длины кабелей, существенно большее число ОМ и требования к динамическому диапазону и временному разрешению для IceCube по сравнению с AMANDA, привели к разработке нового цифрового оптического модуля. К модулю предъявлялись

следующие требования: высокая надежность кабельных коммуникаций и разъемов; реализация функции оцифровки сигналов; встроенные системы калибровки и синхронизации. OM является самостоятельным детектором излучения, который передает оцифрованный сигнал на поверхность по команде из вычислительного центра с помощью витой пары медных проводников. IceCube состоит из 5160 цифровых OM [35], расположенных под поверхностью льда на глубине 1450 – 2450 м на 86 гирляндах в вершинах гексагональной сетки с шагом 125 метров по 60 OM. Вертикальное расстояние между модулями составляет 17 метров.

480 дополнительных OM формируют компактную структуру в центре установки – DeepCore: восемь гирлянд удаленных друг от друга на ~ 70 м по 60 OM расположенных на расстояниях по вертикали 7 м. В этих OM используется ФЭУ с повышенной квантовой эффективностью фотокатода.

Еще 324 OM заморожены парами в баках диаметром 1,8 м на поверхности льда для регистрации атмосферных ливней. В одном баке размещается два OM с разными факторами усиления (1:50), что обеспечивает величину динамического диапазона от одного до 10^5 ф.э.

Каждый ФЭУ окружен μ -металлической сеткой, чтобы экранировать его от магнитного поля Земли. Корпус, крепление и обеспечение оптического контакта ФЭУ в OM AMANDA и IceCube аналогичны. OM состоит из следующих компонентов: источника высоковольтного напряжения, делителя, платы светодиодных источников импульсов для калибровки геометрии массива OM и изучение свойств льда, материнской платы, которая содержит аналоговую и цифровую электронику для обработки сигнала ФЭУ.

На рисунке 1-13 представлена схема (слева) и фотография (справа) OM IceCube.

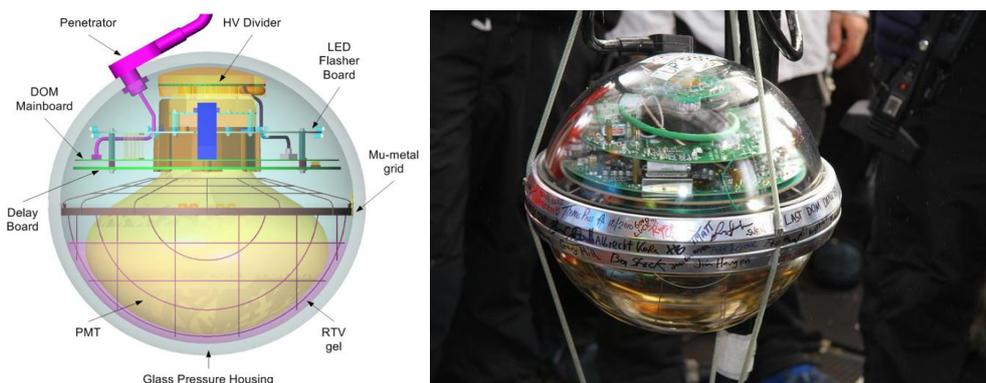


Рисунок 1-13 – схема (слева) [36] и фотография (справа) [37] оптического модуля проекта IceCube

Основные характеристики ФЭУ НАМАМАТСУ R7081-02 OM IceCube:

- диаметр: 25 см;
- площадь фотокатода: 507 см^2 ;

- квантовая эффективность: 25 %;
- разброс времени пролета: 3,2 нс;
- количество динодов: 10;
- пик/долина: 2,5;
- усиление: $1 \cdot 10^7$ на 1500 В;
- о.ф.э. разрешение: > 30 %;
- темновая скорость счета: 0,5 кГц (-40 °С).

Усиления в 10^7 обеспечивает амплитуду однофотоэлектронного (о.ф.э.) импульса ~ 8 мВ, на порядок превышающего шумы электроники ($\sim 0,1$ мВ пик-пик). Величина высоковольтного напряжения ~ 1300 В оптимизирована производителем ФЭУ для достижения максимальной эффективности сбора электронов [38]. Старение фотокатода не влияло на выбор коэффициента усиления, так как, по ожидаемым уровням шума, соответствующий суммарный заряд, поступающий от ФЭУ, будет меньше, чем 1 Кл за 20 лет работы. Был выбран ФЭУ с 10 динодами, т. к. они имеют лучшее соотношение пик-долина при заданном уровне усиления по сравнению с ФЭУ с 12 динодами.

При температурах эксплуатации установки IceCube (-20 – -40 °С) термоэмиссия фотокатода снижается и в темновой скорости счета ФЭУ начинает доминировать вклад от радиоактивных распадов и вспышек в стеклянной колбе ФЭУ. Поэтому по требованиям IceCube колбы поставляемых ФЭУ были изготовлены из специального стекла с низкой радиоактивностью. Это обуславливает низкий уровень шумов ФЭУ (до 500 Гц). Такой уровень шума позволит IceCube обнаруживать нейтрино низких энергий (единицы МэВ) от сверхновых по увеличению коллективной скорости счета фотонов для всей установки, что соответствует большому количеству взаимодействий нейтрино в течение нескольких секунд.

Система питания ФЭУ удовлетворяет требованиям низкого энергопотребления, высокой надежности и устойчивой работы в режиме регистрации высокоамплитудных импульсов продолжительностью до микросекунды. Используется промышленный компактный источник высоковольтного напряжения фирмы EMCO High Voltage Corporation, который обеспечивает и низкое энергопотребление (< 300 мВт) и низкий уровень шума (< 1 мВ пик-пик). Соотношение высокого напряжения на динодах обеспечивается пассивным резистивным делителем с общим сопротивлением 130 МОм. Достаточно высокое общее сопротивление делителя выбирается для минимизации энергопотребления, что является важным экономическим фактором для работы телескопа на Южном полюсе. Катод ФЭУ заземлен, сигнал снимается с анода. Вместо блокирующего постоянный ток конденсатора используется сделанный на заказ тороидальный трансформатор 1:1 с повышенной надежностью к высокому напряжению. В результате

паразитная емкость от анода к входному усилителю составляет всего 30 пФ, что ограничивает накопленную энергию, которая при искрении может повредить аналоговую входную электронику.

Схема делителя смонтирована на печатной плате диаметром 10 см, которая непосредственно припаяна к ФЭУ. Почти все компоненты монтируются на сквозное отверстие в плате припоем и выбраны с запасом по напряжению, чтобы обеспечить долгосрочную надежность. Для подключения к высоковольтному источнику питания и входному усилителю на цифровой плате используются 50-омные коаксиальные кабели.

В качестве основных параметров ОМ использовались: амплитудные и временные характеристики о.ф.э.; динамический диапазон; доля послеимпульсов ФЭУ. Изучение о.ф.э. спектра и временных характеристик ФЭУ производилась при температурных условиях, близких к условиям эксплуатации. Зарядовое о.ф.э. распределение имеет ярко выраженный пик с относительным разрешением $\sim 30\%$. Вид о.ф.э. слабо зависит от усиления ФЭУ. В распределении наблюдается негауссова компонента ($\sim 20\%$), которая соответствует обратному рассеянию первичного ф.э. на первом диноде [39, 40]. Времена срабатываний определялись на уровне 50 % максимума о.ф.э. сигнала. Около 4 % срабатываний найдены на плече (25 – 65 нс) и во вторичном пике на 71 нс, 0,2 % составляют третью структуру (85 – 160 нс). Задержанные срабатывания возникают при обратном рассеянии электрона на первом диноде [39, 41]. Задержка сигналов в ФЭУ пропорционально квадратному корню высоковольтного напряжения.

Отклик ОМ линеен в пределах 10 % до токов ~ 50 мА (31 ф.э./нс) и полностью насыщается на ~ 150 мА. При фиксированной величине входного заряда величина выходного заряда не зависит от длительности импульса в диапазоне от 3 до 400 нс. Длительность выходного импульса близка к длительности о.ф.э. сигнала (~ 10 нс) для входных сигналов до ~ 200 ф.э. При увеличении уровня подсветки до ~ 4000 ф.э. ширина выходного импульса увеличивается до 20 нс (см. рисунок 1-14). При высоких уровнях засветки (~ 200 тыс. ф.э.), амплитуда вторичного пика сравнима по величине с основным пиком, и общая длительность сигнала определяется их суперпозицией (~ 100 нс). При таких засветках можно наблюдать предимпульсы (30 нс до основного пика), обусловленные выбиванием фотонами электронов из первого динода.

Важным параметром ФЭУ является вероятность возникновения послеимпульсов (сигналов, образующихся после регистрации основного импульса). Причина возникновения послеимпульсов связана с ионизацией остаточных газов электронами, ускоренными в ускорительной камере и пространстве между динодами ФЭУ. Образовавшиеся ионы движутся в сторону фотокатода и выбивают из него электроны. Время возникновения послеимпульсов

зависит от массы ионов, которая определяет время пролета в ускоряющем поле [42]. Рисунок 1-15 показывает усредненную форму сигналов ФЭУ для различных уровней засветки. Хорошо видны пики послеимпульсов в областях ~ 600 нс, 2 мкс и 8 мкс, амплитуда которых увеличивается линейно с интенсивностью вспышки.

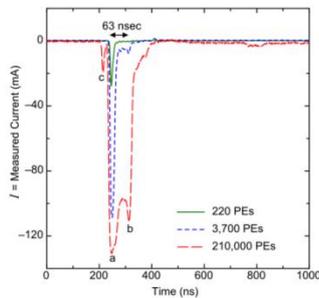


Рисунок 1-14 – средние сигналы для световых импульсов шириной 3 нс: (а) основной пик; (б) вторичный пик из-за искажения электронных траекторий; (с) предимпульсы [38]

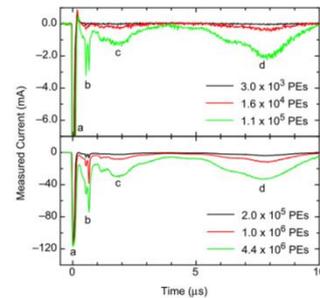


Рисунок 1-15 – форма послеимпульсов ФЭУ для ярких вспышек длительностью 40 нс [38]

В настоящее время в связи с планируемым увеличением эффективного объема нейтринного телескопа IceCube [43] ведутся работы по модернизации оптического модуля. Планируется использовать ФЭУ с повышенной квантовой чувствительностью. Ведутся работы по модернизации и разработке новой электроники и средств связи: оцифровщика, электроники связи, кабельных коммуникаций.

Также проводятся работы по созданию ОМ с несколькими ФЭУ [44]. В качестве корпуса предлагается использовать цилиндрический, стеклянный сосуд, выдерживающий давление до 700 бар с увеличенной толщиной стенки до 18 мм, что позволит без усложнения наработанной процедуры бурения скважин во льду разместить в одной корпусе до 41 ФЭУ диаметром 3" (см. рисунок 1-16).

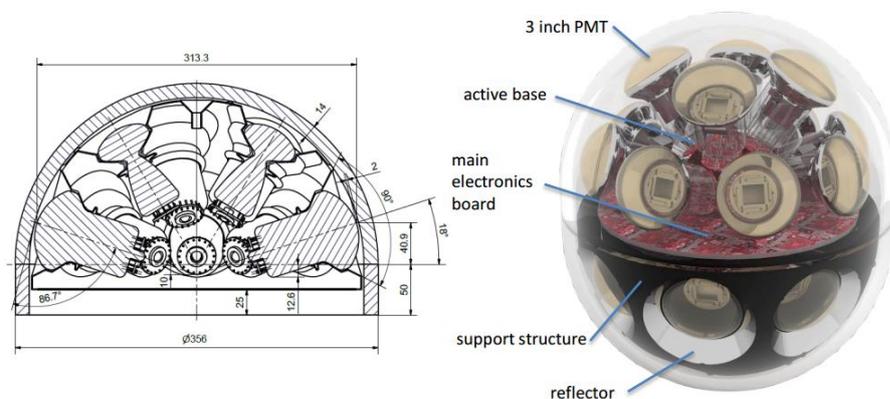


Рисунок 1-16 – проект цифрового оптического модуля с 41 ФЭУ диаметром 3"

Вторым вариантом модернизированного ОМ является проект, в котором в одном корпусе устанавливаются два 8" ФЭУ НАМАМАТСУ R5912-100 [45] с повышенной квантовой чувствительностью, направленные в противоположные стороны (см. рисунок 1-17). Такая конфигурация ФЭУ должна улучшить фактор подавления атмосферных мюонов, а также расширить динамический диапазон ОМ без существенного усложнения конструкции ОМ и изменения процедур монтажа.



Рисунок 1-17 – проект ОМ с двумя ФЭУ диаметром 8"

В настоящее время IceCube рассматривает также проект оптического модуля нового типа (см. рисунок 1-18), использующего шифтер (материал, переизлучающий черенковский свет в область длин, соответствующей большей чувствительности ФЭУ), нанесенный на корпус ОМ [46, 47]. Основная концепция данного проекта заключается в сдвиге длины волны и сборе света с большой площади корпуса ОМ на относительно малый по площади фотокатод ФЭУ. Это позволит улучшить чувствительность ОМ в области ультрафиолетового излучения, где лед более прозрачен и больше фотонов излучения Вавилова-Черенкова ($\sim 1/\lambda^2$). Для такого ОМ существенно увеличивается чувствительность и уменьшается темновой ток. За счет низкой стоимости ОМ этого типа предполагается повысить плотность расстановки модулей.

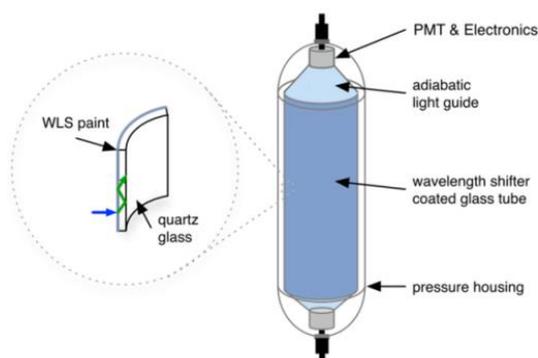


Рисунок 1-18 – эскиз конструкции ОМ с шифтером

В лабораторных условиях удалось добиться эффективности захвата фотона на уровне до 50 % при темновой скорости счета ~ 10 Гц. Чувствительность одного ОМ со сдвигом длины волны с поперечным сечением $A_{xsec} = 2 \cdot R \cdot L = 4000 \text{ см}^2$ эквивалента ~ 8 ОМ IceCube ($A_{xsec} = 707 \text{ см}^2$).

Проект ANTARES

Глубоководный нейтринный телескоп ANTARES расположен на глубине 2400 м в Средиземное море в 40 км от побережья Франции ($42^\circ 50'$ С.Ш., $6^\circ 10'$ В.Д.) и охватывает объем $0,1 \text{ км}^2$ [48, 49]. С 2008 г. сотрудничество ANTARES включило в работу 12 гирлянд. Каждая гирлянда протяженностью около 350 м и состоит из 75 ОМ. Гирлянды закреплены примерно в 70 метрах друг от друга. Каждый из оптических модулей состоит из ФЭУ большой площади и связанной с ним электроникой, размещенных в стеклянной сфере, выдерживающей большое давление. Конструкция оптического модуля ANTARES [50], которая является ключевым элементом детектора, была завершена после обширных исследований. На данный момент сотрудничество входит в группу KM3Net [51]. Схема (слева), фотография (по центру) и схема расположения ОМ (справа) ANTARES представлены на рисунке 1-19.

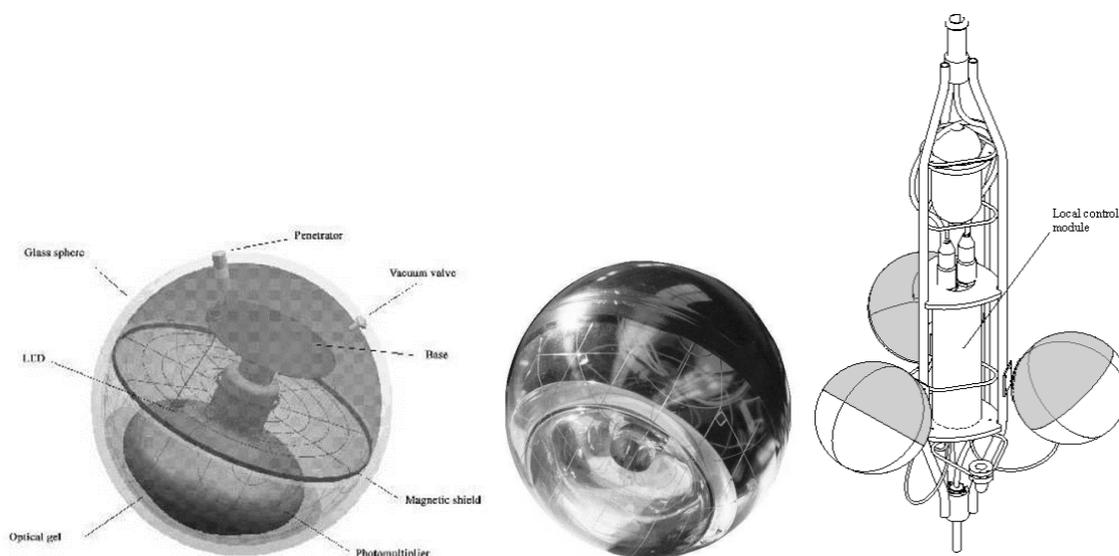


Рисунок 1-19 – схема (слева), фотография (по центру) и схема расположения ОМ ANTARES

Оптический модуль ANTARES разработан на базе 14-диодного 10" ФЭУ НАМАМАТСУ R7081-20, вклеенного при помощи оптического геля в стеклянный корпус с глубоководным разъёмом и вакуумным клапаном, μ -металлической сеткой для экранирования ФЭУ от магнитного поля Земли и блока электроники, включающего в свой состав источник высоковольтного напряжения и светодиодную калибровочную систему. Верхняя часть корпуса ОМ светонепроницаема (окрашена в черный цвет). Вакуумный клапан изготовлен из титана,

чтобы предотвратить риск коррозии. Электрическое соединение между ОМ и локальным модулем управления осуществляется с помощью проходника диаметром 20 мм. Кабель, соединяющий ОМ и локальный модуль управления имеет длину 1,9 м и содержит пять экранированных витых пар сечением 0,4 мм²: одна для передачи электроэнергии (50 В постоянного тока 0,1 А); одна для управления высоким напряжением и мониторинга (от 0 до 4 В); одна для запуска светодиодов (от 0 до +24 В) и две для передачи информации с ФЭУ (одна витая пара подключается между анодом и 14 динодом, вторая - между 12 динодом и землей).

Магнитный экран ФЭУ изготовлен из μ -металла (никель-железного сплава с высокой магнитной проницаемостью 50 – 150 тыс. от Sprint Metal, Франция¹. Шаг сетки 68 мм × 68 мм сводит к минимальным потерям светового потока (менее 4 %) из-за затемнения фотокатода при снижении напряженности магнитного поля более чем в 2,5 раза внутри объема сетки.

Для монтажа ФЭУ в глубоководный корпус ОМ использовался силиконовый каучуковый гель SilGel 612A/B от Wacker-Chemie GmbH, Германия². Это прозрачный гель, который требует четырехчасовой полимеризации при температуре 23 °С, обладает выраженной липкостью и имеет хорошие механические свойства демпфирования. После полимеризации гель имеет показатель преломления 1,404 и длину затухания ~ 60 см на 400 нм (увеличивается с длиной волны).

Для электропитания диодной системы ФЭУ использовался активный делитель напряжения RHQ5912 фирмы iSeg³. Высоковольтный блок монтировался на цоколе ФЭУ. Электропитание блока: ± 5 В. Схема активного делителя (Кокрофт-Уолтон) обеспечивает снижения энергопотребления на фактор 10 по сравнению со стандартным резистивным делителем (до ~ 300 мВт). Стабильность напряжения гарантируется на уровне 10⁻⁴.

Каждый ОМ оснащен светодиодной системой калибровки на базе синего (~ 470 нм) светодиода HLMP-CB15 фирмы Agilent technologies, США⁴. Светодиод монтируется на задней части колбы ФЭУ, обеспечивая освещение центра фотокатода через алюминиевое покрытие колбы. Драйвер светодиода, роль которого заключается в формировании коротких импульсов тока (единицы наносекунд) основан на оригинальной схеме Капустинского и соавторов [52], адаптированный для использования с современными светодиодами и оптимизирован, чтобы уменьшить его электрическое влияние на близлежащие цепи. Максимальная светоотдача

¹ Sprint Metal, Groupe Usinor, 58160 Imphy, France

² Wacker-Chemie GmbH, Hans-Seidel-Platz 4, 81737 Munich, Germany

³ <http://iseg-hv.de/de/home>

⁴ Agilent technologies, 3500 Deer Creek Rd., Palo Alto, CA 94304, USA.

светодиода составляет $\sim 10^8$ фотонов на импульс, длительность импульса составляет 4,5 – 6,5 нс.

Эффективный угловой акцептанс ОМ (определяется как угловая область, где ОМ видит более половины от максимального сигнала), составляет 140° для фронтального освещения.

Сборка ОМ, включая процедуры проверки, занимает около восьми часов.

Проект NESTOR

NESTOR [53] – глубоководный нейтринный телескоп, который должен был быть расположен в Средиземном море у берегов Юго-Западной части Пелопоннеса в Греции на глубине более 3500 м. В марте 2003 года сотрудничество NESTOR успешно развернуло тестовый этаж башни детектора, полностью оборудованной окончательной электроникой и датчиками окружающей среды на глубине 3800 м и находящимся в 80 метрах от донной станции. Развернутый детектор непрерывно эксплуатироваться в течение более одного месяца. 1,1 % всего экспериментального времени было потеряно из-за биолюминесцентной активности вокруг детектора. На данный момент, сотрудничество NESTOR входит в группу KM3Net.

Схема оптического модуля представлена на рисунке 1-20.

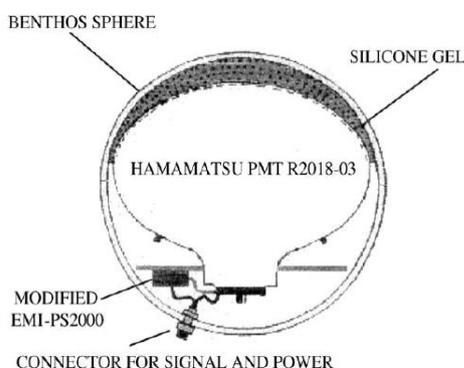


Рисунок 1-20 – схема оптического модуля NESTOR

Оптический модуль NESTOR разработан на базе 15" ФЭУ HAMAMATSU R2018-03 [54]. Подобная конструкция с 20" ФЭУ использовалась в Super-Kamiokande⁵, но такой ФЭУ не подошел для стандартного глубоководного корпуса. Производительность ФЭУ R2018-03 была значительно улучшена по сравнению с предыдущей версией R2018, используемого в DUMAND [26, 55]. Характеристики HAMAMATSU R2018-03:

- диаметр фотокатода: 15" (382 мм);
- спектральная чувствительность: 300-500 нм;

⁵ <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/ykphd/chap3-6.html>

- количество динодов: 13;
- усиление (на оптимальном напряжении): $5 \cdot 10^7$;
- квантовая эффективность: 20 % на 410 ± 30 нм;
- отношение пик-долина: 1,2;
- разброс времени пролета на о.ф.э. уровне (полная ширина по полувысоте): 7 нс;
- темновая скорость счета (порог 0,25 ф.э., 25 °С): < 40 кГц.

ФЭУ устанавливается в сферическом стеклянном корпусе с внутреннем диаметром 400 мм – сфера BENTOS. Корпус состоит из двух полусфер с шлифованными гранями и может выдержать высокое внешнее давление ~ 400 атм. Оптическая связь между колбой ФЭУ и корпусом ОМ достигается с помощью силиконового геля $n = 1,403$ или глицерина. Некоторым недостатком использования силиконового геля является сложность извлечения ФЭУ из стеклянного корпуса в случае его выхода из строя. В качестве альтернативы рассматривалось использование очищенного глицерина. Глицерин был впервые использован в группе ИЯИ РАН – NESTOR еще в 1989. Показатель преломления глицерина 1,478 (ближе к стеклу, чем у геля), и прозрачность на ~ 8 % лучше, чем у геля. Глицерин представляет собой жидкую субстанцию и должен быть изолирован прокладкой в 6 см геля или полиуретана, которые всплывают на поверхности глицерина во время сборки. Методика использования глицерина также применялась БАЙКАЛЬСКОЙ группой [7, 16]. Длинные серии испытаний, выполненные в гипербарической камере и в океане на глубине 4000 м, показали, что гель может держать глицерин в случае вверх смотрящего ОМ, хотя это и требует специальных процедур (грунтование магнитного экрана для лучшего прилипания геля). Для полного заполнения гелем пространства между глубоководным корпусом и колбой ФЭУ требуется ~ 3,5 кг геля, при использовании глицерина: ~ 0,5 кг геля.

Угловая чувствительность оптического модуля может быть аппроксимирована функцией вида $S(\theta) = 0,525 + 0,46 \times \cos(\theta)$, ($-0,95 < \cos(\theta) < 0,9$).

ФЭУ в ОМ окружен μ -металлической сеткой с высокой магнитной проницаемостью [56]. Проект сетки основан на разработках, проведенных в университете Tohoku, Сендай, Япония для нейтринного телескопа DUMAND [26, 57]. Сетки изготавливались из μ -металлической проволоки диаметром 0,8 мм с размером ячейки 17 мм \times 17 мм (~ 8 % затенения области фотокатода). Магнитное поле внутри сетки ослабляется в ~ 8 раз.

Высоковольтное напряжение для делителя ФЭУ формируется преобразователем постоянного тока PS2000 (электропитание 350 мА \times 24 В, выходной ток до 1 мА), изготовленным фирмой THORN-EMI, Англия. Преобразователь расположен на алюминиевом

диске, который также служит теплоотводом. Выходные пульсации напряжения составляют < 20 мВ пик-пик. Среднее время наработки на отказ (MTBF) составляет 300 тыс. ч.

Подключение ОМ к центральной сфере осуществляется гибридным кабелем (коаксиал 50 Ом и четырех изолированных проводников) посредством 7-контактного глубоководного разъема фирмы GISMA GMBH ⁶. Через него выводится сигнал с ФЭУ, подводится электропитание ОМ и линии управления, в том числе управляющее напряжение высоковольтного блока 0 – 10 В [58, 59]. Общая потребляемая мощность ОМ около 6 Вт. Сигналы с ФЭУ мультиплексируются в центральной сфере и передаются на берег с помощью электро-оптического кабеля.

Шумовая скорость счета ОМ меньше 10 кГц при пороге 30 мВ и температуре 25 °С. Доля предимпульсов в интервале 100 – 10 нс перед основным импульсом меньше 2 %. Доля задержанных импульсов и послеимпульсов (в интервале до 30 мкс после основного импульса) менее 3 %. При охлаждении ФЭУ до температуры 15 °С (температура внутри ОМ во время работы в составе установки) скорость счета уменьшается более чем в два раза. ОМ были испытаны во время тестовых натуральных экспериментов в 1996 – 2000 гг. Скорость счета сигналов ОМ составила ~ 70 кГц. Основной вклад в темп счета сигналов ОМ был обусловлен распадами ⁴⁰K.

Проект NEMO

NEMO является действующим сотрудничеством, которое также входит в группу KM3Net [60]. В марте 2013 года башня NEMO Фаза 2 была успешно развернута в районе Капо Пассеро, Сицилия, Италия, на глубине 3500 м из следующих компонентов: 100 км кабеля, связывающего детектор и береговую станцию; береговая станция в гавани Портопало-ди-Капо-Пассеро, глубоководная инфраструктура связи и прототипа детектора из восьмиэтажной башни. Каждый этаж башни представляет собой металлические конструкции длиной 8 м, расположенных по глубине с шагом 40 м друг от друга и ортогонально ориентированных по отношению друг к другу. На каждом конце этажа закреплены по два оптических модуля: вертикальный (направлен вниз) и горизонтальный. Также в центре этажа один коммуникационный модуль. Все данные передаются на берег.

ОМ NEMO [61] состоит из следующих основных компонентов: глубоководного корпуса – стеклянная сфера VITROVEX диаметром 13" с проходником на 12 контактов; 10" ФЭУ НАМАМАТСУ R7081; иммерсионного материала – силиконового геля Wacker SilGel 612; μ -

⁶ <http://www.gisma-connectors.de/index.html>

металлической сетки (производство ИТЭФ, г. Москва) из проволоки диаметром 1 мм с ячейкой 68 x 68 мм (затенение фотокатода $\approx 5\%$, средний коэффициент экранирования ≈ 4); активного делителя высоковольтного напряжения с возможностью отдельной регулировки напряжения на ускорительной камере и системе динодов (плата ISEG PHQ7081-i-2m); блока электроники предварительной обработки сигналов; системы временной калибровки. Схема (слева), фотография (по центру) и схема расположения ОМ NEMO представлены на рисунке 1-21. В глубоководном корпусе ОМ отсутствует вакуумный клапан (сборка осуществляется в специальном вакуумном стенде).



Рисунок 1-21 – схема (слева), фотография (по центру) и схема расположения ОМ NEMO

Проект НТ-200

Нейтринный телескоп НТ-200 [7, 8, 16, 44, 62, 63] расположен в южной части озера Байкал ($51^{\circ} 50' \text{ С.Ш.}$ и $104^{\circ} 20' \text{ В.Д.}$) на расстоянии 3,6 км от берега. Глубина озера в месте расположения телескопа – 1366 м. От берега до телескопа проложено три семижильных кабель-троса (КГ7-90) для подачи электропитания и съема информации и один оптоволоконный кабель, содержащий четыре оптических жилы и три медных. Концы всех береговых кабелей поддерживаются с помощью буйев на глубине 20 м, и далее с помощью перемычек, находящихся на такой же глубине, соединяются с телескопом. Все соединения производятся на воздухе и затем опускаются в воду. При этом не требуется сложной и дорогостоящей техники, необходимой для глубоководных сочленений кабелей. Телескоп НТ-200 содержит 192 оптических модуля (ОМ) на основе фотоприемников Кварзар-370 и 67 модулей с электроникой.

Оптический модуль НТ-200 [9, 10] был разработан на базе гибридного фотодетектора Кварзар-370, специально созданного для этого проекта. Кварзар-370 состоит из электронно-оптического предусилителя и фотоэлектронного умножителя с малым диаметром фотокатода “Байкал-1”. КВАЗАР-370 – имеет несферическую (грибовидную) форму стеклянной колбы диаметром 37 см. В этом фотодетекторе электрон, вылетающий с поверхности фотокатода, ускоряется напряжением $\sim 25 \text{ кВ}$ и попадает в неорганический сцинтиллятор Y_2SiO_5 (YSO),

расположенный вблизи центра колбы. Этот сцинтиллятор имеет световую отдачу 20 – 30 % по отношению к NaI (Tl) и время высвечивания 30 – 40 нс. Свет, рожденный в сцинтилляторе, регистрируется обычным ФЭУ. Один фотоэлектрон, выбиваемый из фотокатода, формирует до 25 ф.э., регистрируемых фотоэлектронным умножителем. Высокий коэффициент умножения обеспечивает высокое о.ф.э. разрешение. В связи с быстрым ускорением первичных фотоэлектронов полем в 25 кВ не требуется магнитное экранирование фотодетектора. Колба фотоприемника изготовлена из боросиликатного стекла S49-1 компанией "ЭКРАН" в г. Новосибирск. Фотокатод бищелочного типа (K_2CsSb). Его спектральная характеристика является типичной для этого типа фотокатода с максимумом при длинах волн от 400 до 420 нм. Спектральная чувствительность превышает 60 мА/Вт при $\lambda = 420$ нм, что соответствует 20 % квантовой эффективности. Неравномерность отклика фотокатода < 30 %. Высокий коэффициент усиления позволяет отделить импульсы одного и двух ф.э. и даже определить плечо от 3 ф.э. Схема ОМ представлена на рисунке 1-22.

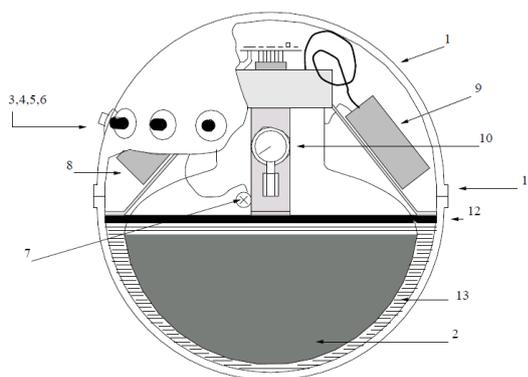


Рисунок 1-22 – схема ОМ НТ-200: 1 – стеклянная полусфера; 2 – Кварз – 370; 3, 4, 5, 6 – глубокowodные разъемы; 7 – светодиод; 8, 9 – источники высоковольтного напряжения; 10 – манометр; 11 – цилиндрическая часть полусферы; 12 – полиуритановая пленка; 13 – глицерин

Из-за высокого напряжения 25 кВ задержка сигнала в КВАЗАР-370 значительно меньше, чем в обычных ФЭУ – около 10 нс. Уровень послеимпульсов в КВАЗАР-370 существенно меньше, чем в обычных ФЭУ (≤ 2 %). Это связано с полным разделением вакуумного пространства электрооптического предусилителя и малого ФЭУ и низкой чувствительностью фотокатода к обратно рассеянным рентгеновским фотонам.

ОМ включает в себя высоковольтные преобразователи напряжения ВИП-35 с выходным напряжением 25 кВ для камеры оптического предусилителя и ВИП-2 с выходным напряжением до 2300 В для питания ФЭУ "Байкал-1". Имеется возможность управления выходным напряжением ВИП-2 с шагом 10 В в диапазоне от 1000 до 2300 В и одновременного отключения ВИП-2 и ВИП-35. Сигналы с анода ФЭУ подаются на быстрый предусилитель с коэффициентом усиления 10, и в дальнейшем используются в системе измерения времени.

Сигналы с 11-го динода через усилитель-инвертор с коэффициентом усиления три поступают в тракт измерения амплитуды. В ОМ для калибровки помещен светодиод возле фотокатода.

Каждый оптический модуль соединен с системным модулем четырьмя коаксиальными кабелями посредством коаксиальных разъемов СРГ-50-863: для подачи напряжения на источники высоковольтного напряжения и кодов управления, для передачи анодных и динодных сигналов и для подачи сигнала запуска светодиода. Разъем имеет волновое сопротивление 50 Ом, рабочее напряжение 500 В и выдерживает изменения температуры от -50 до +150 °С.

В НТ-200 все глубокоководные корпуса, как для фотоприемников, так и для электроники собраны из стеклянных полусфер компании "ЭКРАН" диаметром 50 см. ОМ устанавливаются парами, как показано на рисунке 1-23.

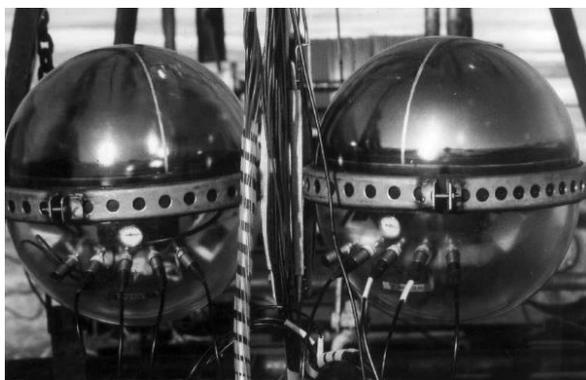


Рисунок 1-23 – фотография пары ОМ, ориентированных фотокатодами вверх. На фотографии видны четыре глубокоководных разъема на каждом ОМ, манометр и металлические дуги с "П-образным" профилем для крепления ОМ к тросу

В качестве иммерсионного материала используется глицерин. На поверхность глицерина наливается жидкий полиуретан. Т. к. плотность полиуретана меньше плотности глицерина, то он остается на поверхности и после полимеризации образует эластичную прослойку между стеклом модуля и колбой. Показатель преломления глицерина 1,47, т. е. практически совпадает с показателем преломления стекла. Глицерин не замерзает до -40 °С и при длительном контакте со стеклом не теряет прозрачности, не разрушает стекло и не теряет с ним контакт (эффект "отслоения" силиконового геля при отрицательных температурах). К недостаткам глицерина следует отнести его электрическую проводимость. В случае повреждения или отслоения полиуретановой пленки капли глицерина могут попасть на электронные компоненты модуля и вывести их из строя. Это особенно опасно для ОМ, ориентированных фотокатодами вверх. Поэтому для ОМ с фотодетектором, направленным вверх, зазор между колбой и стеклом модуля заполнен двухкомпонентным силиконовым гелем SEMICOSIL, производства WACKER, Германия. Показатель преломления SEMICOSIL – 1,4.

Угловая чувствительность оптического модуля может быть аппроксимирована функцией вида $S(\theta) = 0,49 + 0,51 \times \cos(\theta)$, $(-0,95 < \cos(\theta) < 0,9)$.

Проект KM3Net

KM3Net [51] является глубоководной исследовательской инфраструктурой следующего поколения нейтринных телескопов, расположенной на морском дне Средиземного моря на глубине в несколько километров. KM3Net представляет собой нейтринный телескоп с инструментальным объемом несколько кубических километров и расположен на трёх площадках Средиземного моря (с запада на восток): Km3net-Fr у берега Тулон, Франция; Km3net-It у берега Порто Пало-ди-Капо Пассеро, Сицилия, Италия; Km3net-Gr у берега Пилос, Пелопоннес, Греция. Данные будут передаваться непосредственно от мест установки в центр обработки данных в Лионе, Франция. Штаб-квартира KM3Net с проектным офисом расположена в Амстердаме, Нидерланды (Km3net-HQ).

Концепция глубоководной обсерватории в виде гирлянд оптических модулей (нейтринный телескоп большого объёма) и узлов, состоящих из других приборов, успешно опробована сотрудничеством ANTARES, исследовательская инфраструктура которого функционирует с 2008 года. Дизайн KM3Net является результатом десятилетних научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, выполненных в проектах NEMO и NESTOR и сотрудничества ANTARES. Консорциум KM3Net сформирован в 2006 г., 29 января 2013 года сформирована группа для реализации первого этапа развертывания инфраструктуры KM3Net. 27 апреля 2015 г. был успешно установлен первый донный сетевой узел на месте Km3net-Fr. Во время этой операции узел был подключен к 40-километровому электро-оптическому кабелю до береговой станции, который был установлен в декабре 2014 г.

Гирлянда состоит из биев, двух тросов Dупеета© диаметром 4 мм, 18 этажей ОМ (на каждом этаже по одному ОМ, расстояние между этажами 30 – 36 м, расстояние от дна до первого ОМ 100 м) и электро-оптической магистрали (гибкий маслonaполненный кабель диаметром ~ 6 мм, содержащий оптоволокна и медные проводники). ОМ подключается посредством одного оптоволокна, двух проводников и предохранительной коробки [64].

Цифровой оптический модуль KM3Net [65, 66] состоит из следующих компонент:

- 31 x 3" ФЭУ НАМАМАТСУ R12199-02 (суммарная площадь фотокатода соответствует ~ 2,8 x 10" ФЭУ), блоков электроники ФЭУ, колец для увеличения сбора фотонов на ФЭУ;
- 17" стеклянного глубоководного корпуса с несущей конструкцией для крепления ФЭУ и проходником;

- платы сбора данных;
- оптической системы передачи данных: центральной логической платы на основе системы "White Rabbit" [67] со спектральным уплотнением оптической связи;
- вспомогательной электроники: компас, инклинометр, светодиодная калибровочная система, датчики: давления, температуры, влажности;
- блоков электропитания и узла охлаждения.

В нижней полусфере ОМ располагаются 19 ФЭУ, в верхней – 12 (см. схему и фотографию ОМ на рисунке 1-24). Суммарная мощность, потребляемая платами ФЭУ, составляет ~ 140 мВт. Основные преимущества данного ОМ по сравнению с ОМ с одним ФЭУ: увеличенная площадь фотокатода; возможность подавления шумов, используя совпадениями сигналов ФЭУ; улучшенная угловая чувствительность.



Рисунок 1-24 – фотография (слева) и схема (справа) ОМ KM3Net

ФЭУ R12199-02 имеет грибовидную форму колбы со стандартным бищелочным фотокатодом. Коэффициент усиления диодной системы $\sim 5 \cdot 10^6$. Величина предимпульсов для однофотозлектронного импульса составила 0,3 %, величина задержанных импульсов 6,4 %. Распределение послеимпульсов имеет два пика (аналогично 10" ФЭУ) в области задержек ~ 1 мкс и ~ 3 мкс, соответствующих образованию ионов Cs^+ и CH_4^+ [68]. Влияние магнитного поля на 3" ФЭУ не существенно в следствие их меньшего размера, поэтому в ОМ KM3Net не применяется магнитное экранирование. Суммарное потребление модуля $\sim 6,5$ Вт [38, 69].

В настоящее время первые станции с оптическими модулями KM3Net проходят натурные испытания в Средиземном море.

§ 7. Сравнительные характеристики оптических модулей

Оптические модули для разных проектов нейтринных телескопов можно классифицировать по следующим признакам:

- 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).

Фотоэлектронный умножитель. Характеристики фотоэлектронных умножителей оптических модулей основных проектов нейтринных телескопов представлены в таблице 1-2. В качестве характеристик чувствительности ФЭУ к черенковскому излучению используются диаметр (площадь) фотокатода и его квантовая эффективность; временное разрешение определяется разбросом времени пролета фотоэлектронов через камеру ФЭУ; амплитудные характеристики однофотоэлектронного спектра характеризуются отношением пик-долина и относительным разрешением пика. В таблице также представлены: уровень собственных шумов ФЭУ; усиление диодной системы ФЭУ при заданном напряжении на делителе; доля предимпульсов, задержанных импульсов и послеимпульсов на единичный фотоэлектрон.

Как видно из таблицы, общепринятым подходом является установка одного фотоэлектронного умножителя с полусферическим фотокатодом большого диаметра в глубоководный корпус. Исключение составляет проект KM3Net, в котором в одном корпусе монтируется 31 ФЭУ. Такой подход, обладая рядом преимуществ (рекордная суммарная площадь фотокатода, возможность подавления шумов, дополнительная информация о направлении регистрируемого света), требует весьма существенных трудозатрат на сборку и тестирование ОМ, на порядок превосходящих время на подготовку “обычного” оптического модуля. Следует выделить также и проект NT-200, в котором используется гибридный фотодетектор, преимуществами которого, кроме большой площади фотокатода, является рекордное разрешение однофотоэлектронного спектра и нечувствительность к магнитному полю Земли. Ценой за это является необходимость использования высоковольтного источника с напряжением более 20 кВ, что существенно повышает требования к качеству сборки кабельных коммуникаций внутри модуля и приводит к некоторому снижению надежности работы ОМ.

Во всех проектах нейтринных телескопов пытаются добиться максимальной чувствительности к черенковскому свету, величину которой определяет произведение площади фотокатода и его квантовой эффективности. В частности, при развитии проекта IceCube, который использует ФЭУ R7081-02, планируется переход на ФЭУ R7081-100 с большей квантовой эффективностью (25 % и 35 % соответственно). Ограничением на этом пути является резкий рост стоимости единицы площади фотокатода при росте диаметра ФЭУ. Поэтому,

подход KM3Net, который увеличивает суммарную чувствительность ОМ за счет увеличения количества ФЭУ, выглядит оправданным с экономической точки зрения.

Таблица 1-2 – характеристики ФЭУ различных проектов нейтринных телескопов

Проект ОМ	Тип ФЭУ	Диаметр (см) и площадь (см ²) фотокатода	Квантовая эффективность, %	Разброс времени пролета, нс	Количество динодов; отношение пик-долина	О.ф.э. разрешение (%), шумы (кГц)	Усиление (напряжение на делителе, В)	Предимпульсы / задержанные импульсы / послеимпульсы
AMANDA	НАМАМАТСУ R5912-2	Ø 20; 324	~ 25	2,8	14; 1,5 – 2,5		10 ⁹ (1700)	
IceCube	НАМАМАТСУ R7081-02	Ø 25; 507	~ 25	3,2	10; 2,5	> 30; ~0.5 (- 40 °С)	10 ⁷ (1500)	< 1 % / 4 % / 6 %
ANTARES	НАМАМАТСУ R7081-20	Ø 25; 507	~ 25	2,6	14; 2,7	~ 40; 1,9 (+25 °С)	5×10 ⁷ (1760)	
NEMO	НАМАМАТСУ R7081	Ø 25; 507	~ 25	2,8	10; 3,5	~ 32; 1,4 (+25 °С)	5×10 ⁷ (1655)	0,02 % / 5,5 % / 5,5 %
Baikal-GVD	НАМАМАТСУ R7081-100	Ø 25; 507	~ 35	3,4	10; 3,0	~ 36; 5,7 (+25 °С)	10 ⁷ (1500)	... / ~ 6 % / 14 %
HT-200	Квазар-370	Ø 37, 1075	~ 20	3,8	12; 2,5	~ 70; 30 (+25 °С)	25×10 ⁷ (25000)	... / ... / ≤ 2 %
NESTOR	НАМАМАТСУ R2018-03	Ø 38; 1140	~ 20	5,5	13; 1,5	...; < 5 кГц (+15 °С)	5×10 ⁷ (1700)	< 2 % / < 3 % / < 3 %
DUMAND	НАМАМАТСУ R2018	Ø 38; 1140	~ 22					
KM3Net	НАМАМАТСУ R12199-02	31 x Ø 8; 1414	~ 30	≤ 3,9	10; 3,0	...; ~1 (+25 °С)	5×10 ⁵ (1200)	0,3 % / 5 % / 5 %

Характерное временное разрешение ОМ составляет величину 3 – 4 нс, что соответствует уровню неопределенности расстояния от модуля до источника излучения ~ 1 м. Получаемая величина неопределенности расстояния близка к физическому минимуму – размеру оптического модуля.

Характеристики однофотозлектронных спектров ФЭУ: отношение пик-долина и относительное разрешения пика, должны обеспечивать надежное выделение однофотозлектронных пиков для амплитудной калибровки каналов установки. Значения этих параметров определяются характеристиками диодной системы ФЭУ: абсолютной величиной и соотношением коэффициентов размножения электронов на первых и последующих диодах. Оптические модули практически всех проектах спроектированы на основе ФЭУ фирмы HAMAMATSU. Все ФЭУ этой фирмы имеют близкие значения указанных параметров ($\sim 2,5$ пик/долина и $\sim 35\%$ разрешение однофотозлектронного спектра), которые обеспечивают надежное выделение пиков однофотозлектронных распределений.

Оптические модули всех нейтринных телескопов предусматривают возможность регистрации сверхслабых световых потоков, вплоть до единичных фотонов. Это требует надежной регистрации однофотозлектронных сигналов электроникой ОМ на фоне электронных шумов канала, которые составляют величину в несколько милливольт. Величина однофотозлектронного сигнала при этом должна составлять значение не менее 10 мВ. Для достижения такого значения однофотозлектронной амплитуды коэффициенты усиления диодной системы ФЭУ должны быть на уровне $\sim 10^7$. Существенное увеличение усиления ФЭУ приводит к уменьшению диапазона линейности выходных сигналов фотозлектронного умножителя. При уменьшении коэффициента усиления требуется дополнительное электронное усиление сигналов. Величина напряжения на ФЭУ, обеспечивающая заданный уровень усиления, является важным параметром, который определяет требования к диапазону регулировки высоковольтного источника напряжения. Характерное значение высоковольтного напряжения составляет $\sim 1,5$ кВ для усиления 10^7 .

Ограничение на частоту собственных шумов ФЭУ выбирается из условия, что она должны быть существенно меньше, чем шум, обусловленный свечением среды. Уровень однофотозлектронного шума ФЭУ в лабораторных условиях ($+25$ °С) составляет величину 2 – 5 кГц, что является вполне приемлемым при фоновом свечении воды на уровне 20 – 50 кГц.

Доли предимпульсов и послеимпульсов заметно отличаются для разных типов ФЭУ. При этом доля предимпульсов как правило не превышают одного процента, а доля послеимпульсов составляет 5 – 10 %. Влияние предимпульсов на работу оптических модулей зависит от способов обработки и анализа сигналов ФЭУ. В том случае, если производится оцифровка

полной формы импульса фотоэлектронного умножителя, предимпульсы не оказывают влияние на измерение времени регистрации сигнала. Если фиксируется только момент превышения порога, предимпульсы могут исказить реальное время формирования импульса ФЭУ. Послеимпульсы не влияют на результаты измерения временных и амплитудных характеристик сигналов. Однако от них зависит доля высокоамплитудной составляющей шумового спектра ФЭУ, что может оказывать влияние на работу триггерной системы установки.

Методика обработки и передачи сигналов ОМ. После типа фотоэлектронного умножителя следующим отличительным признаком ОМ является методика обработки и передачи сигналов ОМ. По этому признаку оптические модули можно разделить на два типа:

- оптические модули с аналоговым выходом;
- цифровые оптические модули.

В аналоговых ОМ сигнал с ФЭУ усиливается и передается по глубоководным кабелям в блок аналогово-цифровых преобразователей (АЦП), которые размещаются в отдельном корпусе. В цифровых ОМ преобразование аналоговых сигналов осуществляется непосредственно в самом модуле, с которого передаются уже оцифрованные данные.

Первые оптические модули с аналоговыми выходами использовались в экспериментах NT-200 и AMANDA. В эксперименте AMANDA аналоговый сигнал передавался на расстояние до 2 км. При этом временное разрешение каналов ухудшалось до уровня 5 – 7 нс, что заметно снижало точность реконструкции событий. В детекторе NT-200 передача аналогового сигнала осуществлялась на расстояния в несколько метров, что не приводило к ухудшению временных характеристик.

Преимуществом ввода аналоговых сигналов от нескольких ОМ в отдельный электронный блок является возможность организации межмодульных совпадений для формирования локального триггера в целях подавления шумов ОМ. Однако, подавление шумов ОМ требуется не всегда. Для антарктических проектов с низким уровнем шумовых срабатываний каналов (< 1 кГц) формирование локального триггера для оцифровки сигналов не обязательно. Впервые цифровой оптический модуль был успешно применен в нейтринном телескопе IceCube. В установке KM3Net также используется цифровой ОМ. Возможность оцифровки информации внутри ОМ в этом проекте обусловлена применением оптоволоконной системы передачи данных от оптического модуля. Высокая скорость оптоволоконной линии связи позволяет эффективно передавать данные от ОМ при уровне шумовых срабатываний каналов в сотни кГц. В свою очередь возможность использования оптоволоконной линии связана с тем, что гирлянда ОМ полностью монтируется в лабораторных условиях, и для подключения

ОМ используются не разъемы, а проходники (оптоволоконная жила вводится через проходник в ОМ). В антарктических экспериментах сталкивались с проблемами ломки оптического волокна в момент замерзания воды.

Оптимизация электропотребления ОМ. Величина энергопотребления оптического модуля ограничивается, главным образом, возможностями подвода электроэнергии к детектору. Наиболее сильное ограничение по электропитанию присутствует в антарктических проектах из-за высокой стоимости электроэнергии. Для средиземноморских экспериментов ограничение связано главным образом с тем, что электропитание передается по глубоководным кабелям значительной длины (десятки километров). Для байкальских установок ограничение на потребление ОМ также связано с глубоководной системой электропитания, но в виду относительной простоты прокладки кабелей и их меньшей протяженности (5 – 6 км), эти ограничения менее жесткие, чем в средиземноморских проектах.

Основной способ снижения электропотребления ОМ – минимизация тока через делитель напряжения фотоэлектронного умножителя. Для этого либо применяют пассивные делители с высоким омическим сопротивлением (130 МОм в установке IceCube), либо используют активные делители (KM3Net, NEMO), ток через которые практически не проходит. Недостаток активного делителя – значительный уровень наводок на спектрометрический канал. Кроме того минимизируется состав электроники ОМ, которая потребляет электроэнергию. Так, в KM3Net, где в одном ОМ установлены 31 ФЭУ, оцифровка формы импульса не производится. Измеряются только время прихода сигнала и ширина импульса при фиксированном пороге.

Монтаж ФЭУ в корпус ОМ. Для монтажа фотоэлектронных умножителей в корпус оптического модуля в качестве иммерсионного материала для обеспечения оптической связи стеклянного корпуса и колбы ФЭУ применяют либо силиконовый гель, либо глицерин. Силиконовый гель обеспечивает механическое крепление ФЭУ и магнитного экрана, компенсирует деформацию корпуса ОМ под действием давления, поглощает возможные вибрации при транспортировке и установке ОМ. Глицерин дешевле, имеет несколько лучшие оптические характеристики (показатель преломления ближе к показателю преломления стекла) и обеспечивает лучший контакт со стеклом (гель при перепадах температуры и давления может отслаиваться от стекла и образовывать пузыри, которые, в дальнейшем, рассеивают свет). Главными недостатками глицерина является необходимость механического крепления ФЭУ и магнитного экрана, и необходимость изоляции жидкого глицерина от других компонент ОМ (глицерин является проводником и при попадании на электронику ОМ может привести к выходу её из строя). Это приводит к усложнению процедуры сборки ОМ.

Защита от магнитного поля Земли. Магнитное экранирование применяется практически во всех оптических модулях с ФЭУ с большим диаметром фотокатода, т. к. магнитное поле Земли оказывает значительное влияние на траекторию фотоэлектронов в ускорительной камере ФЭУ. Это приводит к зависимости эффективности сбора фотоэлектрон и временных характеристик от ориентации фотоэлектронного умножителя. При малом размере ускорительной камеры, как для 3" ФЭУ в эксперименте КМ3Net, эффект значительно ниже и не требует магнитного экранирования. В эксперименте НТ-200 применяется значительная величина высоковольтного напряжения на оптическом предусилителе (> 20 кВ), что позволило добиться хороших показателей сбора фотоэлектронов без магнитного экранирования. В качестве магнитных экранов используются сетки из пермаллоя. В зависимости от диаметра фотокатода размер ячейки сетки выбирается в диапазоне от 2 до 7 см. Для малых размеров ячейки сетки степень экранирования повышается, но увеличивается эффект затенения света, который может достигать уровня 5 – 7 %.

Глубоководный корпус ОМ. Основное назначение корпуса – защита электронных компонентов ОМ от воздействий окружающей среды, в частности от гидростатического давления на больших глубинах (до нескольких километров). В проектах нейтринных телескопов в основном используются стеклянные корпуса фирмы VITROVEX (Германия). Корпуса, которые применялись в эксперименте НТ-200 (компания "ЭКРАН", Россия) в настоящее время не производятся.

Глава 2. Требования к ОМ Baikal-GVD

Требования к техническим и конструктивным параметрам оптического модуля для глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD определяются особенностями места расположения телескопа, параметрами водной среды, методикой развертывания детектора и принципом организации системы сбора данных установки.

Местом проведения Байкальского нейтринного эксперимента является район акватории озера Байкал, примыкающий к 106-км Кругобайкальского участка Восточно-сибирской железной дороги (ВСЖД), где реализуется оптимальное сочетание гидрологических, гидрофизических и ландшафтных факторов, необходимых для создания и функционирования нейтринного телескопа. Географические координаты места расположения комплекса Байкальского нейтринного телескопа составляют $51^{\circ} 50'$ с. ш., $104^{\circ} 20'$ в. д. Данный район побережья оз. Байкал достаточно хорошо освоен, он электрифицирован, здесь проходит Кругобайкальский участок ВСЖД. Важным фактором, повлиявшим на выбор места расположения телескопа, является наличие достаточно развитой инфраструктуры в этой части побережья озера, позволяющей, в частности, осуществлять транспортировку грузов и научного оборудования по железной дороге.

Глубина озера в этом районе составляет 1300 – 1400 м на расстояниях от трёх километров от берега. Плоский рельеф дна озера на протяжении нескольких десятков километров обеспечивает принципиальную возможность развертывания детектирующих систем глубоководного телескопа в объеме более 10 кубических километров. Место расположения Байкальской нейтринной обсерватории (БНО) показано на рисунке 2-1.

Наличие с середины февраля до середины апреля устойчивого ледового покрова позволяет вести работы по развертыванию телескопа, а также ремонтные, профилактические и исследовательские работы непосредственно со льда, используя его как прочную и неподвижную монтажную платформу. Качество ледового покрова, отсутствие устойчивых полей торошения и станových щелей является определяющим условием с точки зрения безопасности проведения операций по монтажу глубоководного оборудования и прокладке подводных кабельных линий. Сроки безопасного ведения работ обычно превышают 8 недель.

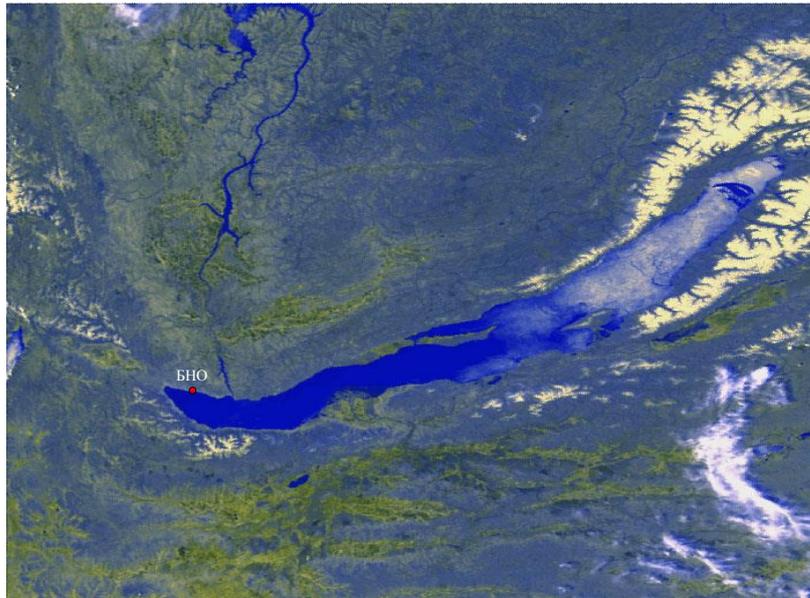


Рисунок 2-1 – место расположения Байкальской нейтринной обсерватории

Сборка телескопа осуществляется при помощи лебедок, которые устанавливаются на льду во время проведения монтажных работ в месте расположения установки. С лебедок через майны (специально прорезаемые отверстия во льду размерами $\sim 1,5 \times 1,5$ м) под воду опускается кабель-трос. По мере опускания кабель-троса, на него монтируются глубоководные модули установки и “накладные” кабельные коммуникации, связывающие модули между собой. Возможность сравнительно простого и оперативного монтажа (и демонтажа) модулей телескопа обеспечивает ремонтпригодность детектора. Методика развертывания установки в значительной степени определяет конфигурацию его регистрирующей системы. Детектор состоит из набора вертикальных гирлянд установленных на дно озеро Байкал (гирлянды фиксируются на дне при помощи якорей). Гирлянды представляют собой линейную структуру оптических модулей и модулей системы управления, закрепленных на кабель-тросе и связанных кабельными коммуникациями. Модули с электроникой, управляющей работой гирлянд, размещают вблизи к поверхности (глубина ~ 25 м) для упрощения их обслуживания.

Из перечисленных особенностей установки следует ряд требований, предъявляемых к электронным системам телескопа:

- Монтаж аппаратуры телескопа со льда оз. Байкал требует использования разъемов для соединения глубоководных модулей между собой (использование проходников неэффективно). Это не позволяет применять высокопроизводительную оптоволоконную систему передачи информации с оптических модулей. Ограничение на скорость передачи данных требует использования межмодульных совпадений для подавления шумовых срабатываний установки. Для организации совпадений оптические модули на

гирлянде объединяются в группы, которые формируют локальные триггера детектора. Наиболее простой способ организации системы межмодульных совпадений – использование оптических модулей с аналоговыми выходами, которые подключаются к модулю управления и обработки сигналов.

- Аппаратура детектора доступна для ремонта в ограниченный период времени: около двух месяцев в течение года. В этих условиях концентрация электронных систем в единичных глубоководных модулях, управляющих работой группой ОМ, существенно упрощает ремонт глубоководной аппаратуры, поскольку при фиксированном количестве неисправных каналов уменьшается количество гирлянд, содержащих неисправности, а продолжительность ремонта определяется временем, необходимым для подъема гирлянды из-под воды.
- Количество модулей в группе ограничивается, главным образом, длиной кабельных коммуникаций в пределах группы, которая, в свою очередь, зависит от расстояния между ОМ на гирлянде. Характерное расстояние между модулями не должно превышать длину поглощения света в байкальской воде (~ 20 м). Учитывая ограничения на длину кабелей в ~ 100 м (увеличение длины приводит к заметному усложнению процесса монтажа гирлянд) и размещение модуля управления в центре группы, количество модулей в группе должно составлять значение ~ 10.
- Для организации электропитания телескопа используется система энергоснабжения железной дороги. Что в значительной степени снимает ограничение на общее электропотребление детектора: в настоящее время это ограничение составляет 200 кВт. Учитывая перспективы развития телескопа (до ~ 10 тыс. оптических модулей) и полагая, что до половины электроэнергии может быть использованы на нужды Байкальского стационара, ограничение на потребление одного канала установки, включая ОМ, составляет 10 Ватт.

Проект телескопа Baikal-GVD представлен в работах [11–13, 70–78]. Телескоп будет иметь модульную структуру, формируемую из 12 функционально законченных установок – кластеров вертикальных гирлянд оптических модулей. Модульная структура телескопа позволяет вести набор экспериментальных данных уже на ранних этапах развертывания установки, обеспечивает масштабируемость и, при изменении научных приоритетов, адаптивность конфигурации телескопа к новым требованиям.

Каждый кластер Baikal-GVD является функционально законченным детектором, способным работать как в составе единой установки, так и в автономном режиме. В состав

кластера входит 8 гирлянд оптических модулей. ОМ на гирляндах объединяются в группы (секции). Секция [70, 79, 80] представляет собой основную структурную единицу системы сбора данных телескопа, обеспечивающую регистрацию световых сигналов, формирование локального триггера на основе межмодульных совпадений, преобразование аналоговой информации в цифровой код и передачу ее в береговой центр сбора данных. Организация системы сбора данных секции позволяет формировать различные конфигурации ОМ. Возможна установка оптических модулей на различных расстояниях друг от друга индивидуально или попарно. На одной гирлянде могут быть размещены несколько секций ОМ.

Электропитание аппаратуры телескопа осуществляется от берегового источника питания постоянным напряжением 300 В. В соответствии с иерархической структурой установки, система электропитания кластера разделена на два уровня. Первый уровень включает в себя управляемый 12-канальный коммутатор электропитания гирлянд, который размещен в центре кластера. Коммутаторы второго уровня установлены на каждой гирлянде. Они позволяют производить независимое включение и отключение электропитания секций гирлянд. Такая организация электропитания обеспечивает устойчивую работу системы в целом при выходе из строя отдельных ее элементов (гирлянд и секций).

Базовый вариант конфигурации кластера, который стал основой для дальнейших экспериментальных и расчетных работ в рамках подготовки научно-технического проекта Baikal-GVD представлен на рисунке 2-2. Базовая конфигурация кластера включает в свой состав восемь гирлянд, расположенных на расстоянии 60 м друг от друга.

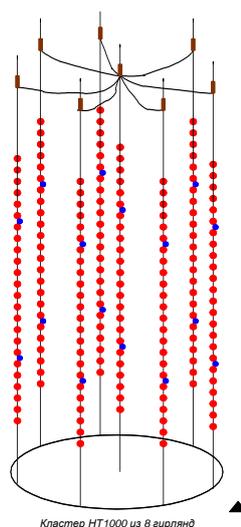


Рисунок 2-2 – базовая конфигурация кластера Baikal-GVD

Оптические модули на гирлянде сгруппированы в две секции. Каждая секция состоит из 12 ОМ, расположенных на расстоянии 15 м вдоль гирлянды, и центрального модуля секции (ЦМ). Структурная схема секции представлена на рисунке 2-3.

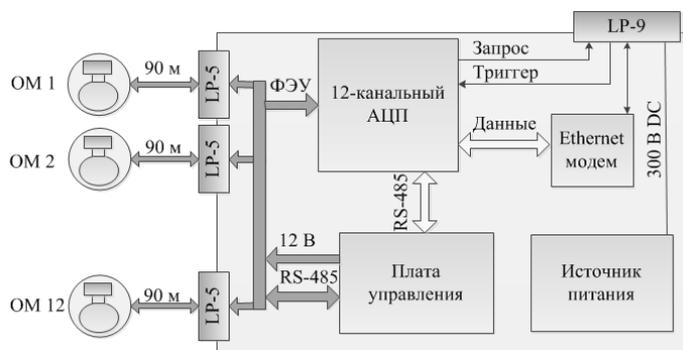


Рисунок 2-3 – блок-схема секции Baikal-GVD

Плата управления секции включает в свой состав шесть коммутируемых каналов управления RS-485 и 12 каналов реле для включения и выключения напряжения на ОМ (12 В). К каждому каналу RS-485 может быть подключено до двух оптических модулей.

Аналоговые сигналы с ОМ передаются в ЦМ по коаксиальным кабелям длиной около 90 м. В ЦМ осуществляется амплитудно-цифровое преобразование сигналов от оптических модулей. Для этого используются АЦП с частотой дискретизации 200 МГц. Функциональная схема одного измерительного канала платы АЦП представлена на рисунке 2-4.

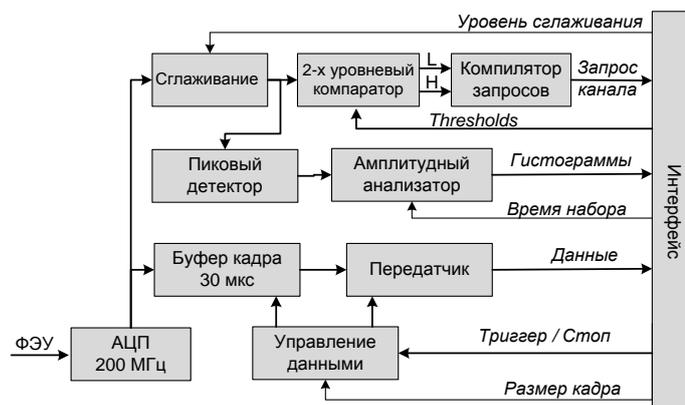


Рисунок 2-4 – функциональная схема одного канала платы АЦП

Данные, оцифрованные АЦП, транслируется в программируемую пользователем вентильную матрицу (FPGA). Программное обеспечение FPGA, загружаемое по каналу передачи данных, обеспечивает управление, буферизацию и первичную обработку поступающей от АЦП информации. Буфер памяти FPGA позволяет накапливать данные о форме входных сигналов во временном интервале до 30 мкс. К измерительному каналу

подключен пиковый детектор и амплитудный анализатор, которые аккумулируют мониторинговую информацию. Формирование триггера осуществляется на основе информации, формируемой в каналах запросов плат АЦП. Каждый канал запросов включает в свой состав устройство сглаживания сигналов, двухуровневый цифровой компаратор с управляемыми порогами (низкий порог L и высокий порог H) и компилятор запросов L и H, транслируемых в триггерный блок. Значения порогов компаратора в зависимости от поставленной физической задачи могут варьироваться для разных каналов и, при штатном режиме работы детектора составляют величину ~ 1 ф.э и ~ 3 ф.э. для L и H соответственно. Ожидаемая скорость счета регистрации событий кластера из восьми гирлянд при данных значениях порогов составляет величину около 100 Гц.

Конструктивные и технические особенности нейтринного телескопа Baikal-GVD накладывают ряд требований на функциональный состав аппаратуры и характеристики оптических модулей.

Требования к параметрам выходного сигнала ОМ. На выходе оптического модуля должен формироваться аналоговый сигнал, который поступает через коаксиальный кабель на центральный модуль секции для последующей обработки: преобразования в цифровую форму, измерения момента регистрации, величины светового потока и формирования межмодульных совпадений. Параметры сигнала определяются временными характеристиками АЦП: частота дискретизации 200 МГц (один временной отсчет составляет 5 нс). Соответственно, длительность сигнала после прохождения через кабель должна быть не менее 4 – 5 отсчетов АЦП для надежной оценки его заряда (20 – 25 нс), а передний фронт не менее двух отсчетов для корректной оценки времени регистрации сигнала (~ 10 нс).

Требования к энергопотреблению ОМ. Как указывалось выше, ограничение на энергопотребление одного канала установки составляет величину ~ 10 Ватт. На оптический модуль должно приходиться не более половины этой величины. В то же время дополнительное снижение энергопотребления желательно с точки зрения оптимизации системы кабельных коммуникаций. Увеличение энергопотребления ОМ приводит к увеличению сечения медных проводников глубоководных кабелей, что увеличивает их вес и значительно ухудшает их эргономичность при проведении монтажных работ.

Требования к электропитанию ОМ. Электропитание поступает к оптическим модулям по глубоководным кабелям длиной около 100 метров. При энергопотреблении ОМ менее 5 Ватт потери в кабеле не значительны и для питания ОМ можно использовать относительно низкое напряжение в 12 В (чем ниже напряжение – тем выше надежность глубоководных разъемов). Вопрос заключается в выборе типа преобразователя напряжения 300 В – 12 В. На первых

прототипах гирлянд питание ОМ осуществлялось от линейных преобразователей постоянного напряжения. Электропитание 12 В поступало на ОМ по тому же проводнику, по которому передавались сигналы от ФЭУ. Объединение электропитания со спектрометрическим каналом заметно упрощает систему глубоководных кабельных коммуникаций секции Baikal-GVD. Возможность применения такой схемы обуславливалось применением линейных преобразователей постоянного напряжения, которые обладают низким уровнем собственных шумов (менее 5 мВ). Недостатком их является низкий КПД (около 60 %). В целях минимизации электропотребления требуется применение импульсных преобразователей напряжения (КПД более 90 %). Поскольку эти преобразователи имеют существенно более высокий уровень шумов (порядка 20 – 30 мВ), чем линейные преобразователи, электропитание и сигналы ОМ должны передаваться по разным проводникам.

Требования к корпусу ОМ. Помимо очевидных требований к прозрачности в диапазоне длин волн черенковского излучения, надежной защите от попадания воды внутрь корпуса и гидростатического давления до ~ 1,5 км (максимальная глубина оз. Байкал), корпус ОМ должен обеспечивать экранирование ФЭУ от магнитного поля Земли, оптический контакт между корпусом и стеклом колбы ФЭУ. Кроме того корпус ОМ должен быть оснащен герметичным глубоководным разъемом для вывода сигнала ФЭУ, ввода электропитания (по независимым жилам) и линии управления RS-485.

Требования к составу электроники ОМ. Электроника ОМ должна обеспечивать возможность управления напряжением на фотоэлектронном умножителе в диапазоне от 0 до ~ 2000 В и усиления сигнала с выхода ФЭУ. Кроме того, электронная система оптического модуля должна быть оснащена блоком мониторинга параметров ОМ (скорости счета шумовых срабатываний, напряжения ФЭУ, электропитания) и системой контроля ОМ при помощи калибровочных источников света.

Общие требования. Дополнительно к перечисленным требованиям, ОМ должен обладать высоким уровнем надежности (среднее время наработки на отказ более 100 лет) и эргономичности. Это 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 (улучшения угловых характеристик ОМ): рамой, бандажом, электроникой и пр.

Глава 3. Основные компоненты

Общий вид оптического модуля представлен на рисунке 3-1. 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.



Рисунок 3-1 – модель оптического модуля (слева) и фотография оптического модуля смонтированного на гирлянде (справа)

§ 1. Глубоководный корпус

Фотоэлектронный умножитель с полусферическим фотокатодом размещается в 17-дюймовым (42 см), сферическом, глубоководном корпусе VITROVEX производства фирмы Nautilus Marine Service GmbH (Германия)⁷ из боросиликатного стекла. Такие свойства, как стойкость к коррозии, легкость, химическая, электрическая и магнитная инертность и оптические свойства делают стекло идеальным материалом для использования в глубоководной среде. Корпус, с одной стороны, способен выдерживать высокое, внешнее, гидростатическое давление водной массы и обеспечивать гидрозащиту электроники ОМ, с другой стороны, прозрачен для черенковских фотонов.

Коэффициенты преломления стекла и воды близки, что обеспечивает оптический контакт. Недостатком стекла является его высокий коэффициент поглощения на длинах вол

⁷ www.nautilus-gmbh.de

менее 350 нм. Данный недостаток не является существенным, т. к. на данном диапазоне длин волн также снижается квантовая чувствительность ФЭУ.

Зависимость оптической прозрачности (коэффициента пропускания) в зависимости от длины волны излучения представлена на рисунке 3-2. Также оптическая прозрачность стекла VITROVEX была представлена в статье [16]. Основные характеристики боросиликатного стекла VITROVEX представлены в таблице 3-1.

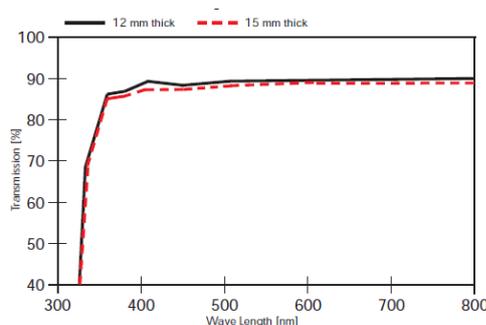


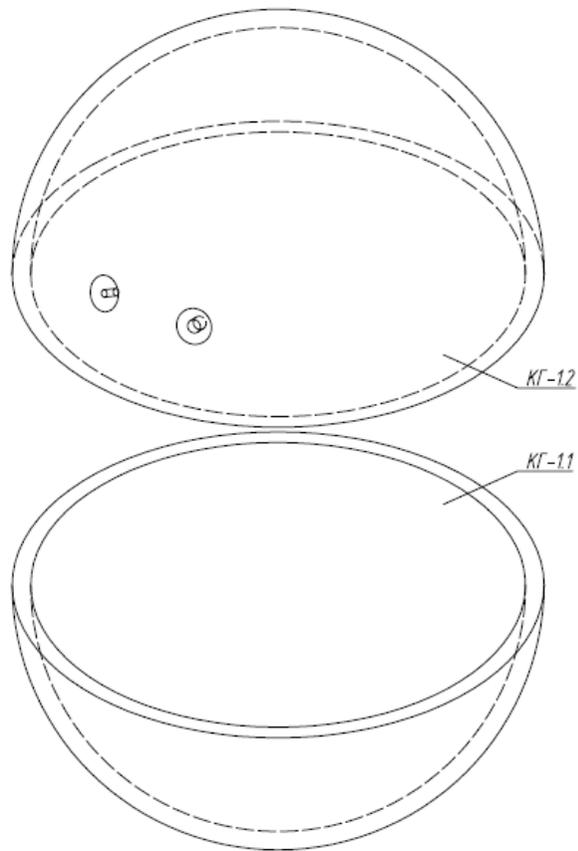
Рисунок 3-2 – зависимость оптической прозрачности боросиликатного стекла VITROVEX от длины волны излучения

Таблица 3-1 – характеристики боросиликатного стекла VITROVEX

Оптические свойства:	
показатель преломления n_d	1,472
дисперсия $n_f - n_c$	$72,6 \times 10^{-4}$
коэффициент оптической чувствительности по напряжениям	$4,0 \times 10^{-6} \text{ мм}^2 / \text{Н}$
Коэффициент пропускания (8 мм при 500 нм)	89 %
Коэффициент ослабления (8 мм при 500 нм)	% 1 дБ
Физические свойства:	
Модуль Юнга	63 ГПа
Коэффициент теплового расширения	$3,3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{К}$
Удельный вес при 25 °С	$2,23 \text{ г/см}^3$
Коэффициент Пуассона	0,20
Теплопроводность при 90 °С	$1,2 \text{ Вт/м} \times ^\circ\text{К}$
Удельная теплоемкость	$0,8 \text{ Дж/г} \times ^\circ\text{К}$
Химические свойства:	
Удельное сопротивление DIN ISO 695	% 146 мг/дм^2
Сопротивление к кислотам DIN 12116	% $0,3 \text{ мг/дм}^2$
Водостойкость DIN ISO 719	% 31 мкг Na_2O на г стекла $0,03 \text{ мл/л}$ (HCL с = 0,01 мл / л)

(основание излучение)

Чертеж глубоководного корпуса с отверстиями для вакуумного порта и глубоководного разъема представлен на рисунке 3-3.



Наименование: корпус глубоководный стеклянный;
 тип: 1 (для оптического модуля);
 артикул: КГ-1;
 состав: две полушеры производства Vitrovex (Германия);
 внешний диаметр: 432 мм (17");
 толщина стенки: 14 мм

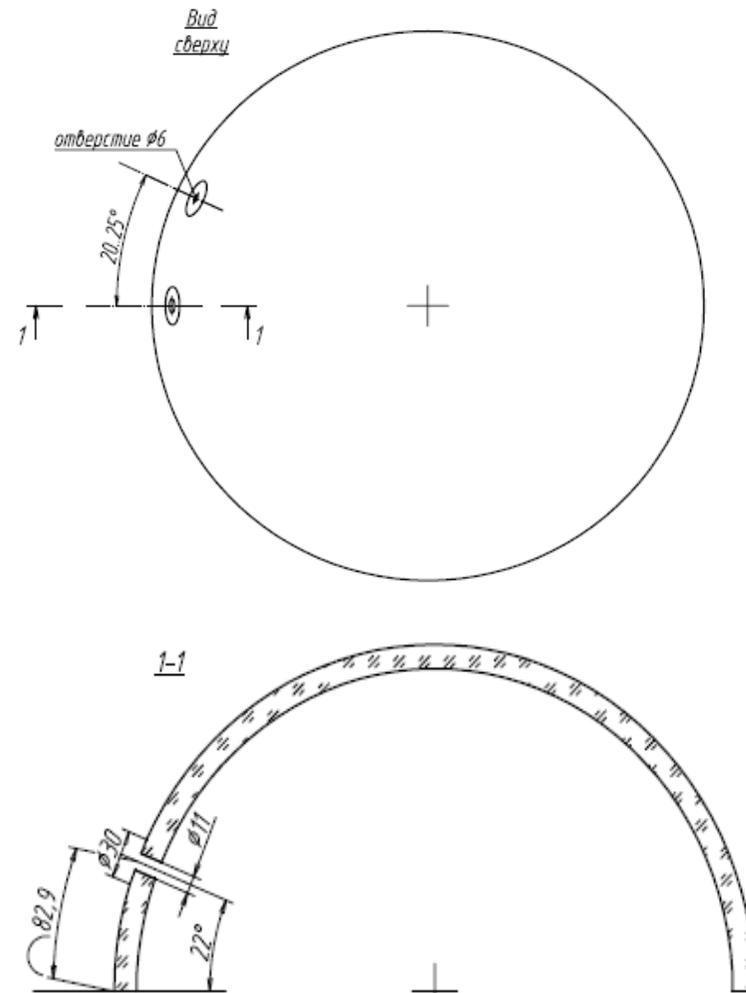


Рисунок 3-3 – чертеж глубоководного корпуса ОМ

На корпус ОМ устанавливаются глубоководный разъем 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. Для предотвращения восстановления давления внутри глубоководного корпуса во время хранения и транспортировки ОМ, граница раздела глубоководного корпуса герметизируется герленом.

Глубоководный разъем

На глубоководный корпус устанавливается блочный 5-и штырьковый низкопрофильный глубоководный разъем-розетка из нержавеющей стали в неопреновом корпусе SUBCONN LPBH5FSS⁸, который предназначен для передачи аналогового сигнала от фотоэлектронного умножителя, управления работой ОМ и снабжением электропитанием. На кабеле устанавливается ответная часть SUBCONN LPIL5M – линейный, глубоководный, кабельный, 5-и штырьковый разъем-вилка в неопреновом корпусе. С разъемами также поставляются заглушки, которые необходимы для предотвращения порчи и загрязнения разъемов во время хранения и транспортировки.

Чертежи глубоководного разъема и его посадочного места на корпусе представлены на рисунке 3-4. Спецификации разъема и его материалов представлены в таблицах 3-2 и 3-3.

⁸ <http://macartney.com/low-profile-series-list-available-types>

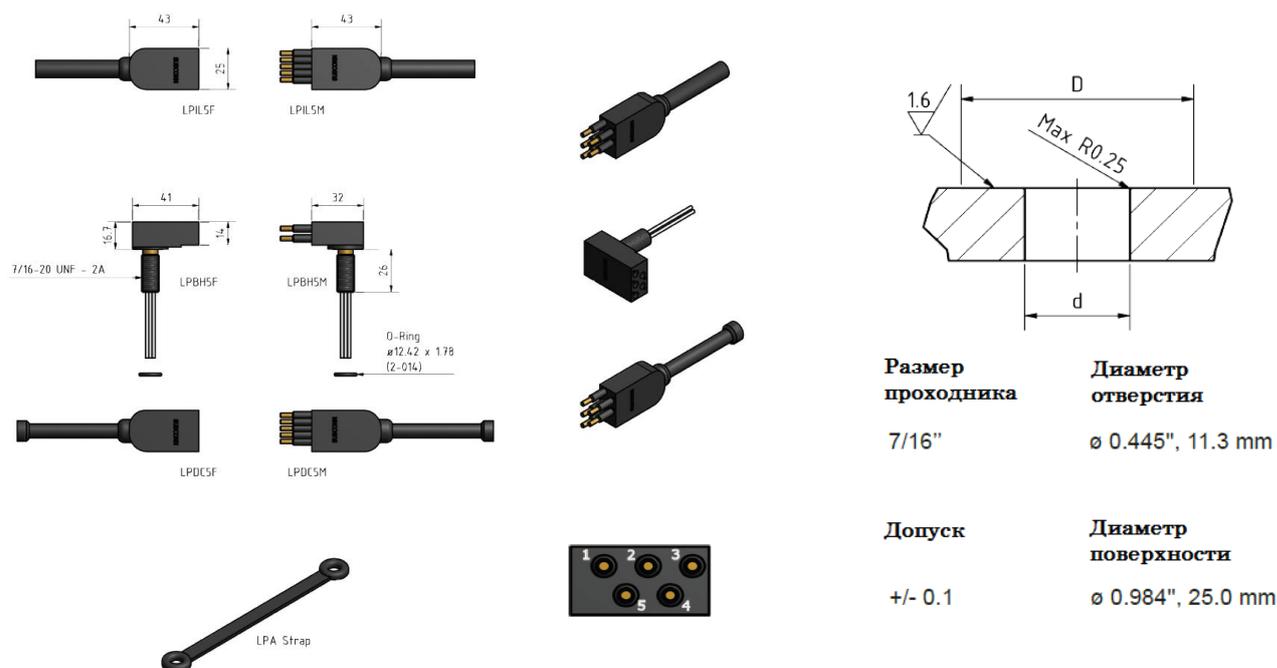


Рисунок 3-4 – чертежи глубоководного разъема и его посадочного места на корпусе

Таблица 3-2 – спецификация разъёма SUBCONN LPBH5FSS

Параметр	Спецификация
Номинальное напряжение	600 RMS V AC
Номинальная сила тока	10 А на контакт (максимум 40 А на разъём)
Сопротивление изоляции	> 200 МОм
Контактное сопротивление	< 0,01 Ом
”Мокрое” соединение	> 500 раз
Номинальная температура (вода)	от -4 до 60 °C, от 25 до 140 °F
Номинальная температура (воздух)	от -40 до 60 °C, от -40 до 140 °F
Диапазон температур хранения	от -40 до 60 °C, от -40 до 140 °F
Номинальная глубина	700 бар, 10000 фунтов на квадратный дюйм

Таблица 3-3 – спецификация материалов разъёма SUBCONN LPBH5FSS

Параметр	Спецификация
Разъём	Хлоропреновый каучук
Переключки	Корпус латунь, нержавеющая сталь
Контакты	Позолоченная латунь UNS - C36000
Уплотнительные кольца	Нитрил
Встроенный кабель (60 см)	18 AWG (американский стандарт калибра проводов) 1,0 мм ² хлоропренового каучука

Параметр	Спецификация
Провода блочного разъёма (60 см)	18 AWG (американский стандарт калибра проводов) 1,0 мм ² помеченные бирками, покрытые PTFE (тефлон)
Гайки и шайбы	Нержавеющая сталь AISI 316 или латунь UNS - C36000

При монтаже разъёма на глубоководный корпус ОМ при затягивании гайки проходника применяется крутящий момент 14,0 Нм и анаэробный герметик для долговременной фиксации.

Разъёмы не должны подвергаться воздействию длительных периодов жары и прямых солнечных лучей. Если разъём становится очень сухим, он должен быть пропитан пресной водой перед использованием. Поскольку длительное хранение ОМ на прямых солнечных лучах не допускается в силу отрицательного влияния солнечных лучей на фотокатод ФЭУ, то для развертывания ОМ в зимнюю экспедицию данное ограничение не оказывает значительного влияния на эксплуатацию ОМ.

При соединении разъёма используется смазка Molykote 44 Medium или аналогичная. Допускается подводное соединение ответных частей разъёма. Схемы "сухого" и "мокрого" соединения разъёма представлены на рисунке 3-5.



Рисунок 3-5 – схемы "сухого" (сверху) и "мокрого" (снизу) соединения разъёма

При необходимости, очистка разъёма производится с помощью спрея для очистки контактов на основе изопропилового спирта или сжатым воздухом от компрессора на месте (на льду перед непосредственным подключением ОМ).

Иммерсионный материал

Для снижения потерь излучения вследствие отражений света от границ раздела материалов: корпуса ОМ, колбы ФЭУ и воздушной прослойки между ними –

пространство между ФЭУ и стеклянным корпусом заполняется иммерсионным материалом, в качестве которого используется силиконовый гель (показатели преломления боросиликатного стекла 1,47, силиконового геля 1,404, воды 1,33). Используется силиконовый двухкомпонентный гель SilGel 612A/B фирмы Wacker-Chemie GmbH (Германия)⁹, который 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. Характеристики геля приведены в таблице 3-4. Оптическая прозрачность геля Wacker SEMICOSIL 912 была представлена в статье [16]. SilGel отличается лучшими оптическими свойствами¹⁰, чем SEMICOSIL.

Таблица 3-4 – характеристики геля WACKER SilGel® 612 A/B

Характеристики	Значение
Компонент А	
Цвет	прозрачный
Вязкость при 23 °С	1000 мПа·с
Плотность при 23 °С	0,97 г/см ³
Компонент В	
Цвет	прозрачный
Вязкость при 23 °С	1000 мПа·с
Плотность при 23 °С	0,97 г/см ³
Катализируемая смесь (А+В)	
Соотношение смешения (по массе), максимальная твердость	1,5:1
Вязкость смеси	1000 мПа·с
Время жизни при 23 °С	150 мин
Цвет	прозрачный
Плотность при 23 °С	0,97 г/см ³
Диэлектрическая проницаемость	2,7
Объёмное сопротивление	10 ¹⁵ Ом·см

⁹ <http://www.wacker.com>

¹⁰ WACKER SILGEL® The Specialist for Sensitive Devices [Электронный ресурс]. URL: https://www.wacker.com/cms/en/products/brands_3/wacker-silgel/wacker-silgel.jsp (дата обращения: 01.09.2016).

Характеристики	Значение
Коэффициент преломления	1,404
Коэффициент упругости	0,005 МПа
Коэффициент теплопроводности при 20 – 150 °С	0,20 Вт/мК
Линейный коэффициент температурного расширения	$300 \cdot 10^{-6}$ м/мК
Коэффициент пропускания (толщина слоя 10 мм)	> 80 %
Линейный коэффициент усадки	< 0,1 %
Время полной полимеризации слоя 1 см (условия отверждения)	8 ч при 23 °С
	30 мин при 150 °С.

Применение геля позволяет одновременно решить следующие задачи:

- механическое крепление ФЭУ и магнитного экрана к полусфере глубоководного корпуса,
- обеспечение компенсации деформации глубоководного корпуса под воздействием высокого давления (диаметр сферы на глубине уменьшается на ~ 1 мм, что при плотном контакте с ФЭУ могло бы привести к растрескиванию стекла колбы ФЭУ);
- обеспечение оптического контакта стёкол колбы ФЭУ и глубоководного корпуса ОМ.

Магнитный экран

Для уменьшения влияния магнитного поля Земли на работу фотоэлектронного умножителя ФЭУ защищен экраном (сеткой) из отожженного пермаллоя, уменьшающей влияние магнитного поля Земли на величину сигнала ФЭУ при его повороте с ~ 30 % до 5 – 8 % (в зависимости от места засветки фотокатода: центр или периферийная часть). Магнитный экран представляет собой проволочную сетку (диаметр проволоки 1 мм) с ячейкой приблизительно 4 см x 4 см, изготовленную из сплава с магнитно-мягкими свойствами – пермаллой (μ-металл). Сетка отжигается после сварки в атмосфере аргона. Фотография магнитного экрана представлена на рисунке 3-6. Характерная величина эффекта затенения фотокатода магнитным экраном составляет величину 5 – 7 %.



Рисунок 3-6 – фотография магнитного экрана

Крепление ОМ на гирлянде

Крепление ОМ к несущему тросу гирлянды осуществляется при помощи специально разработанной рамы (см. рисунок 3-1), сваренной из нержавеющей, немагнитной стали из двух кольцевых прутков, пластин между ними и системы крепления к несущему тросу гирлянды. Для предотвращения контакта металлических деталей рамы со стеклянным корпусом ОМ используются спиральные силиконовые прокладки. Использование прутков и спиральных силиконовых прокладок позволило минимизировать затемнение ФЭУ несущими элементами ОМ и обеспечить надежную и простую фиксацию ОМ к несущим конструкциям телескопа. Следует отметить, что при креплении ОМ при помощи рамы расстояние от центра фотокатода до оси троса составляет величину около 25 см. Из-за вращения троса неопределенность в положении ФЭУ составляет величину ± 25 см, что соответствует временной неопределенности ~ 2 нс.

§ 2. Фотозлектронный умножитель

Для преобразования черенковского излучения в электрические сигналы необходим детектор света с высоким временным разрешением (на уровне единиц наносекунд), высокой квантовой эффективностью в области длин волн $\sim 300 - 400$ нм и большой площадью. При этом собственный уровень шумов такого прибора должен быть ниже светимости воды оз. Байкал. На текущий момент за единственным исключением (НТ-200, где применялся оптический предусилитель и ФЭУ), в нейтринных телескопах в качестве фотодетекторов используются фотозлектронные умножители (ФЭУ).

Торцевая часть стеклянной колбы ФЭУ покрыта фотокатодом. Фотон, достигающий фотокатода, с определенной вероятностью (квартовой эффективностью) выбивает электрон, называемый фотоэлектроном, который ускоряется электрическим

полем внутри камеры ФЭУ. Попадая на первый диод, фотоэлектрон выбивает несколько электронов, которые ускоряются электрическим полем до следующего диода. Продолжая этот процесс, достигается многократное умножение электронов. Характерная величина коэффициента преобразования ФЭУ составляет 10^7 электронов на один фотоэлектрон.

Натурные испытания ОМ проводились в оз. Байкал в период с 2008 по 2010 годы [81–83]. В 2008 году была установлена гирлянда из шести оптических модулей для изучения методики регистрации излучения Вавилова-Черенкова электроникой на основе быстрых АЦП. В 2009 г. гирлянда была расширена до 12 ОМ – две секции по 6 ОМ каждая. Расстояния между ОМ составляли 10 м, общая длина гирлянды – 110 м. В гирлянде использовались ФЭУ Photonis XP1807 с 12" фотокатодом и НАМАМАТСУ R8055 с 13" фотокатодом. В 2009 году фирма НАМАМАТСУ анонсировала новый ФЭУ R7081HQE с 10" фотокатодом повышенной квантовой эффективности (более 30 %), который в 2010 году был испытан в составе экспериментальной гирлянды.

На рисунке 3-7 представлены оптические модули, разработанные для Байкальского нейтринного телескопа на основе ФЭУ PHOTONIS XP1807 (12", ~ 24 %), НАМАМАТСУ R8055 (13", ~ 20 %) и НАМАМАТСУ R7081HQE (10", ~ 35 %).



Рисунок 3-7 – прототипы ОМ на базе ФЭУ PHOTONIS XP1807 (слева), НАМАМАТСУ R8055 (в центре) и НАМАМАТСУ R7081HQE (справа)

С 2009 года фирма Photonis прекратила выпуск фотоэлектронных умножителей. В свою очередь фирма НАМАМАТСУ не подтвердила возможность массового производства ФЭУ R8055. Таким образом, ФЭУ R7081 остался практически единственным доступным фотоэлектронным умножителем с большим диаметром фотокатода (от 10 дюймов). Существует несколько модификации ФЭУ R7081, отличающиеся квантовой эффективностью. Зависимость квантовой эффективности ФЭУ серии НАМАМАТСУ R7081 от длины волны излучения представлена на рисунке 3-8.

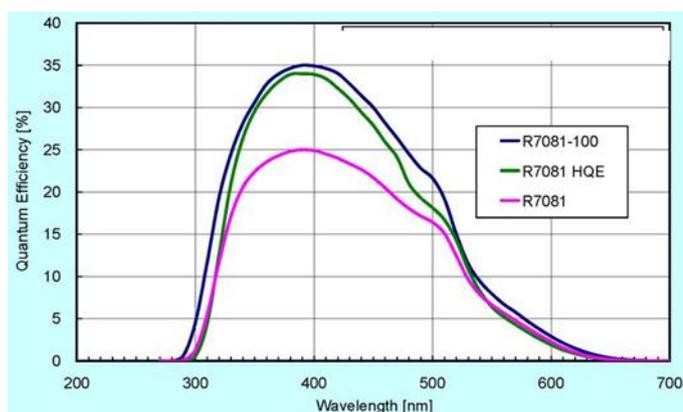


Рисунок 3-8 – зависимость квантовой эффективности ФЭУ НАМАМАТСУ R7081 от длины волны

ФЭУ R7081-100 (см. рисунок 3-9) имеет полусферический фотокатод диаметром 25 см и 10-диодную систему усиления. Основные характеристики ФЭУ представлены в таблице 3-5.



Рисунок 3-9 – фотография ФЭУ НАМАМАТСУ R7081-100

Таблица 3-5 – спецификация ФЭУ НАМАМАТСУ R7081-100 [17]

Характеристика	Значение
Диаметр колбы	254 мм (10")
Минимальная эффективная область	Ø 220 мм
Область спектральной чувствительности	300 – 650 нм
Характерная квантовая эффективность фотокатода (в максимуме ~ 400 нм)	35 %
Ток фотокатода от вольфрамовой лампы накаливания 2856 К	130 мкА/Лм
Ток фотокатода от вольфрамовой лампы накаливания 2856 К, проходящий через синий светофильтр с максимумом пропускания при 400 нм	13,5 мкА/Лм
Характерное усиление	$1,0 \times 10^7$
Ток анода от вольфрамовой лампы накаливания 2856 К	1300 А/Лм
Характерное напряжение, обеспечивающее усиление 10^7	1500 В
Максимальное напряжение (до пробоя)	2000 В

Характеристика	Значение
Система динодов	Коробчатая линейная, 10 динодов
Уровень собственных шумов (при 25 °С)	8000 Гц
Разброс времен пролета фотоэлектронов в камере ФЭУ (FWHM)	3,4 нс
Отношение пик-долина	2,8
Анодный ток после 30 минутного хранения в полной темноте ⁽¹⁾ .	500 нА (характерный) 1000 нА (максимум)
Максимальный усредненный ток за любой интервал 30 секунд.	0,1 мА
Рабочий диапазон температур	- 30 ... + 50 °С
Время нарастания анодного импульса с 10 до 90 % от пиковой амплитуды в условиях равномерного освещения фотокатода	3,8 нс
Время пролета электрона (от момента рождения фотоэлектрона до достижения выходного импульса пиковой амплитуды)	62 нс
Разброс времени пролёта (полная ширина на полувысоте)	3,4 нс
Диапазон линейности ⁽²⁾	40 мА (2 % уровень) 60 мА (5 % уровень)

(1) Причины возникновения темнового тока можно классифицировать следующим образом: 1) термоэлектронная эмиссия с фотокатода и с динодов; 2) ионизации остаточных газов 3) сцинтилляции в стекле (в случае отклонения электронов от своей нормальной траектории, они могут попасть в стеклянную колбу ФЭУ, что может вызвать вспышку света) 4) омическая утечка тока в результате плохой изоляции стеклянного основания ФЭУ и разъема, загрязнения или повышенной влажности; 5) испускание электронов под действием электрического поля в колбе ФЭУ (рекомендуется эксплуатировать ФЭУ на величину ~ 100 ниже максимального значения).

(2) Причиной нелинейности является главным образом объемный заряд, образующийся в области старших динодов на последних стадиях умножения. Величина заряда зависит от амплитуды импульсов (количества фотоэлектронов), тока и напряженности электрического поля между динодами.

При поставке фотоэлектронных умножителей фирма-производитель предоставляет паспорт на каждый индивидуальный прибор. В паспорте представлены следующие характеристики ФЭУ:

- величина высоковольтного напряжения для усиления 10^7 : HV;
- отношение пик-долина однофотоэлектронного распределения: P/V;
- разброс времен пролета фотоэлектронов в камере ФЭУ: TTS;

- темновая скорость счета: Dark Counts;
- чувствительность катода: Cathode Luminous Sens;
- чувствительность анода: Anode Luminous Sens;
- темновой анодный ток: Anode Dark Current;
- чувствительность катода для длины волны ~ 400 нм: Cathode Blue Sens Index;
- максимальная квантовая эффективность фотокатода: Q_{\max} .

В таблице 3-6 представлен пример представления параметров ФЭУ производителем.

Таблица 3-6 – характеристики ФЭУ по данным производителя

Номер	Партия	HV, V	P/V	TTS, ns	Dark Counts, Hz	Cathode Luminous Sens, $\mu\text{A}/\text{lm}$	Anode Luminous Sens, A/lm	Anode Dark Current, nA	Cathode Blue Sens Index	Q_{\max} , %
ZT0057	13.09.10	1650	2.75	3.518	13100	111	573	250	10.8	32.6
ZT0058	13.09.10	1330	2.49	3.788	4500	101	2610	120	10.7	34.2
ZT0060	13.09.10	1330	2.66	3.824	13600	109	2750	510	10.8	35.4

На рисунках 3-10 – 3-12 представлены распределения фотоэлектронных умножителей по параметрам Q_{\max} , HV, TTS, P/V и Dark Counts.

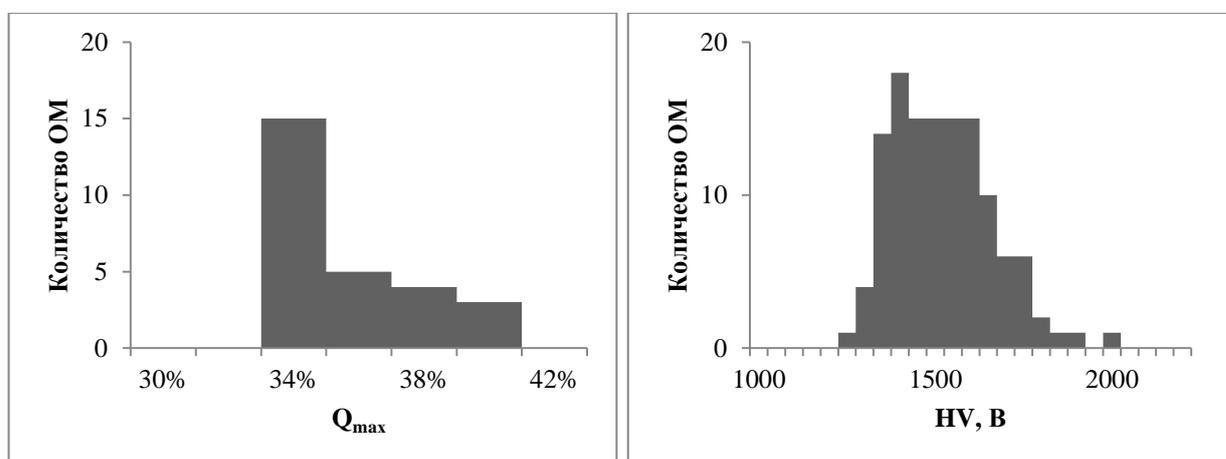


Рисунок 3-10 – распределения фотоэлектронных умножителей по параметрам: Q_{\max} (слева) и HV (справа)

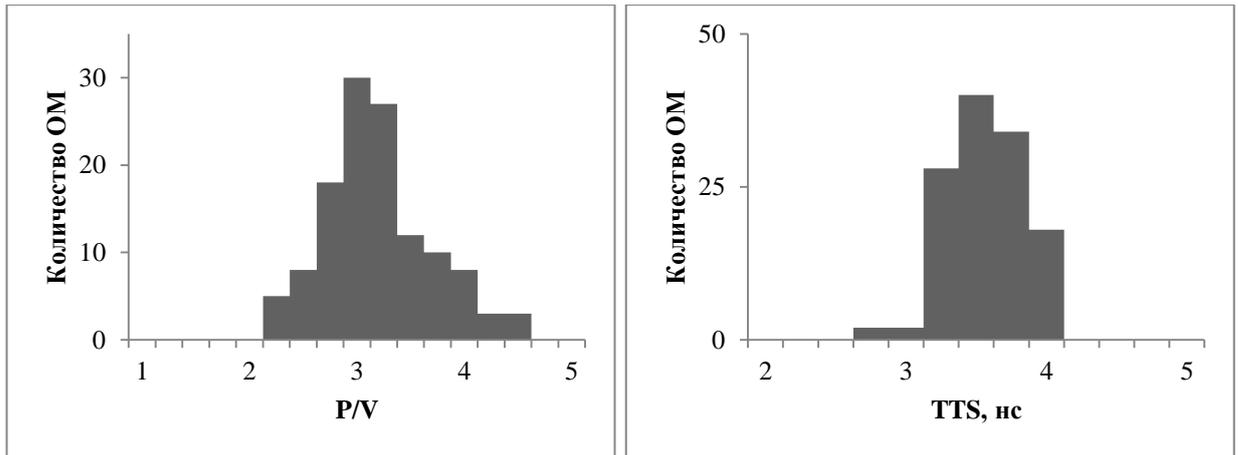


Рисунок 3-11 – распределения фотоэлектронных умножителей по параметрам: P/V (слева) и TTS (справа)

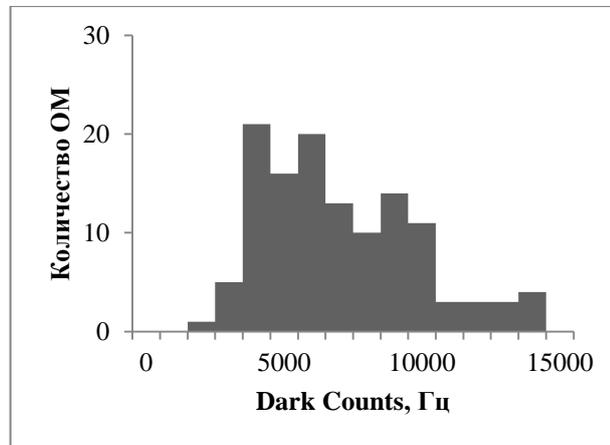


Рисунок 3-12 – распределения фотоэлектронных умножителей по параметру Dark Counts

На рисунке 3-13 представлена схема выходного разъема и чертеж колбы ФЭУ.

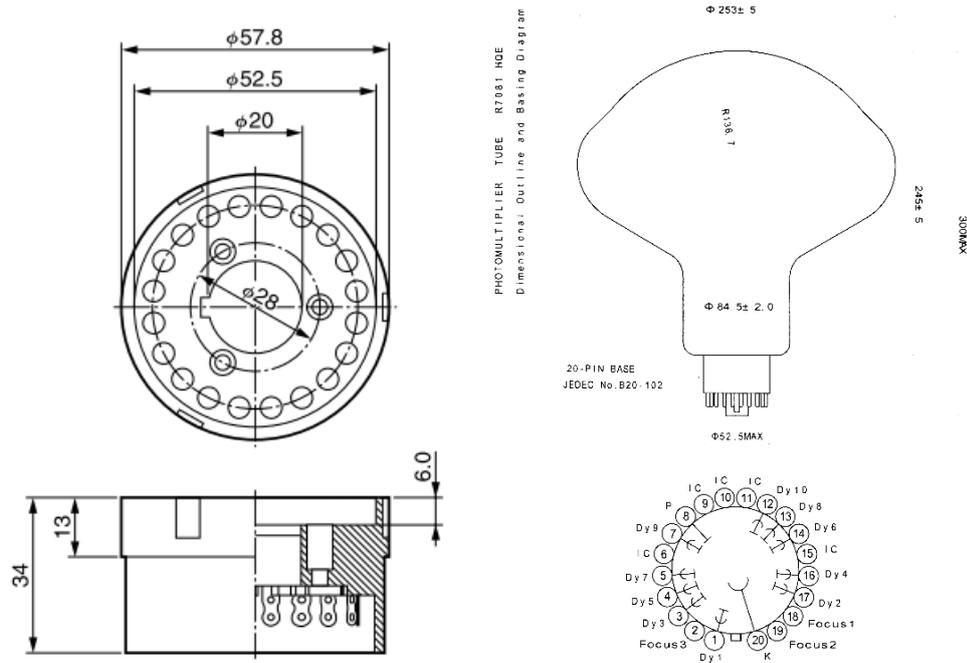


Рисунок 3-13 – выходной разъема и колба ФЭУ R7081

§ 3. Блок электроники ФЭУ

Блок электроники оптического модуля устанавливается непосредственно на цоколь ФЭУ, который способен удерживать до 2-ух кг нагрузки (общий вес блока электроники ОМ составляет $\sim 0,8$ кг). Связь электронного блока с модулем центра секции осуществляется через 5-контактный разъем SUBCONN. Непосредственно на разъеме устанавливается коммутационная плата (см. рисунок 3-14), 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).

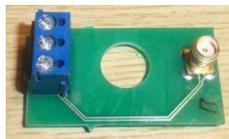


Рисунок 3-14 – коммутационная плата для подсоединения блока электроники ОМ к глубоководному разъему

В состав блока электроники ОМ входят источник высоковольтного напряжения, плата делитель-усилитель и блок управления (контроллер ОМ), включающий в себя светодиодную калибровочную систему. Внешний вид блока электроники ОМ представлен на рисунке 3-15.



Рисунок 3-15 – блок электроники ОМ, установленный на цоколе ФЭУ

Блок-схема электроники ОМ представлена на рисунке 3-16.

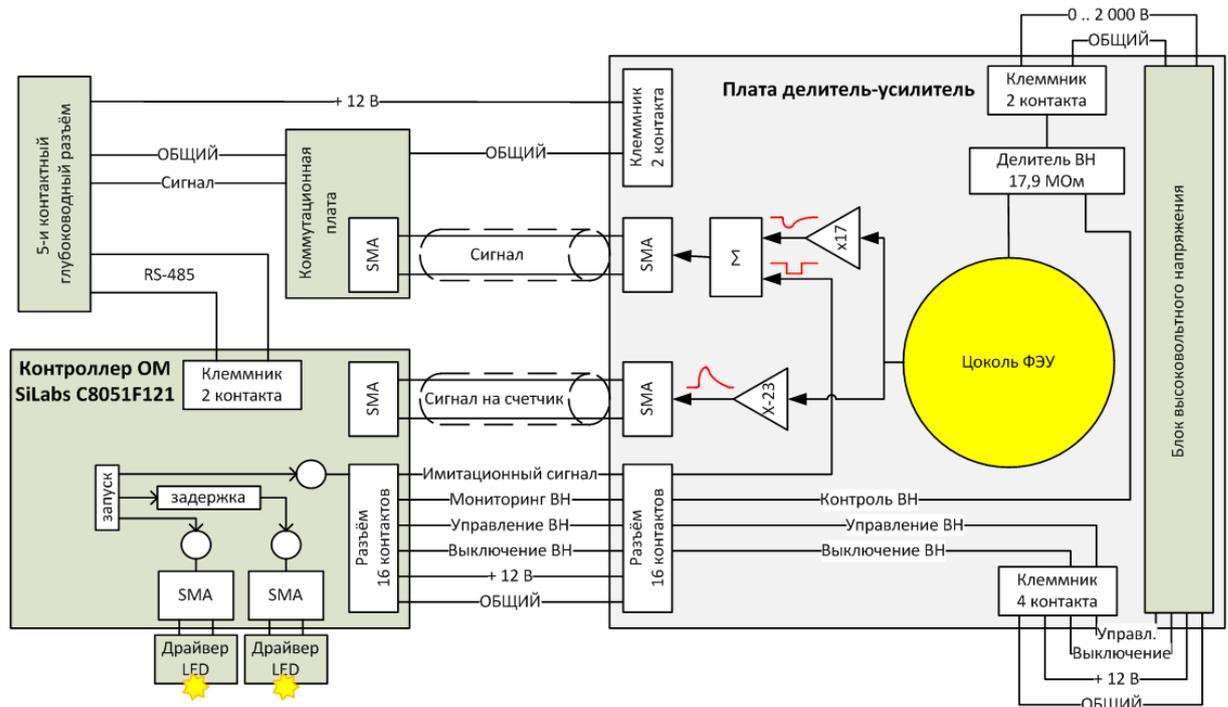


Рисунок 3-16 – блок-схема электроники ОМ

Источник высоковольтного напряжения TRACO POWER PHV12-2.0K2500P (Япония) обеспечивает электропитание делителя ФЭУ напряжением положительной полярности (максимальный выходной ток 1 мА). Выбранный источник имеет низкий уровень шумов (8 мВ пик-пик, полоса частот шумов ~ 20 МГц) и обладает высокой стабильностью выходного напряжения (0,05%), величина которого может устанавливаться в диапазоне от 0 до 2,5 кВ при помощи управляющего напряжения в диапазоне 0–2,5 В с шагом ~ 1 мВ. Это обеспечивает точность подбора рабочего напряжения ФЭУ не хуже 1 В.

Чтобы исключить разность потенциалов между анодом ФЭУ и внешней электроникой (усилителем) традиционно используется делитель напряжения с заземленным анодом и высоким отрицательным напряжением на фотокатоде. Однако, в случае использования ФЭУ под водой, использование такой схемы приводит к увеличению уровня шумов. Поэтому практически во всех нейтринных экспериментах (исключение составляет детектор KM3Net), используется схема подключения делителя с заземленным фотокатодом и высоким положительным напряжением на аноде. Схема с заземленным фотокатодом используется и в Байкальском эксперименте. Для изоляции высоковольтного напряжения применяется разделительный конденсатор. Данная схема не может обеспечить выходной сигнал постоянного тока и используется только в импульсном режиме.

Междиодные напряжения ФЭУ выбирались в соответствии с рекомендациями фирмы производителя фотоэлектронных умножителей. Схема делителя напряжения представлена на рисунке 3-17. Полное сопротивление делителя составляет 18 МОм.

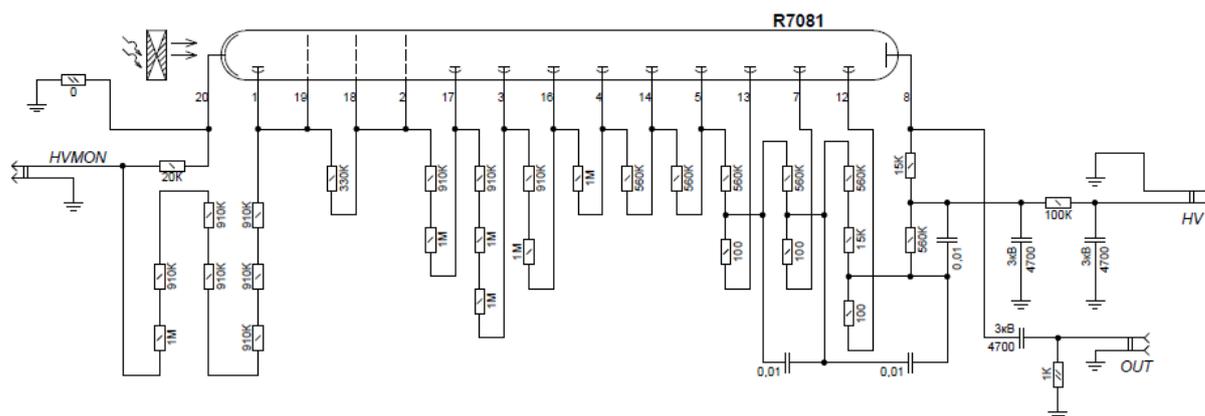


Рисунок 3-17 – схема делителя напряжения ФЭУ

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 ~ 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 ~ 14).

Второй канал инвертирует сигналы ФЭУ и усиливает их в ~ 20 . Эти сигналы поступают на счетчик шумовых импульсов контроллера ОМ для измерения уровня шумов канала. Локальные вариации интенсивности свечения байкальской воды могут приводить к увеличению скорости счета отдельных каналов в 5 – 10 раз. Мониторинг скорости счета каналов позволяет оперативно корректировать параметры триггерной системы (кратность совпадений и пороги регистрации каналов), вплоть до исключения канала из процедуры формирования триггера.

На рисунке 3-18 представлены форма и характеристики выходных сигналов усилителя, измеренные при помощи высокочастотного цифрового осциллографа LeCroy (частота дискретизации 1 ГГц). Передние фронты сигналов составляют величину ~ 11 нс (P3:fall и P5:fall на рисунке). Такая длительность переднего фронта обеспечивает измерение напряжения сигнала в области переднего фронта как минимум в двух точках (один временной отсчет АЦП Baikal-GVD составляет 5 нс). Аналогичные временные параметры имеет и задний фронт импульса, формируя однофотоэлектронный сигнал длительностью около 25 нс. Такая длительность сигнала обеспечивает надежное измерение его заряда 5-наносекундным АЦП.

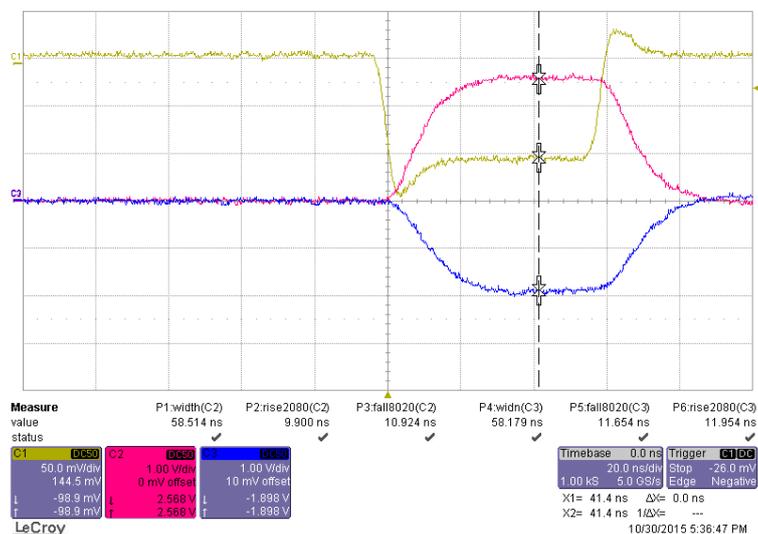


Рисунок 3-18 – общий вид и характеристики выходных сигналов усилителя, измеренные при помощи высокочастотного цифрового осциллографа

Схема усилителя представлена на рисунке 3-19.

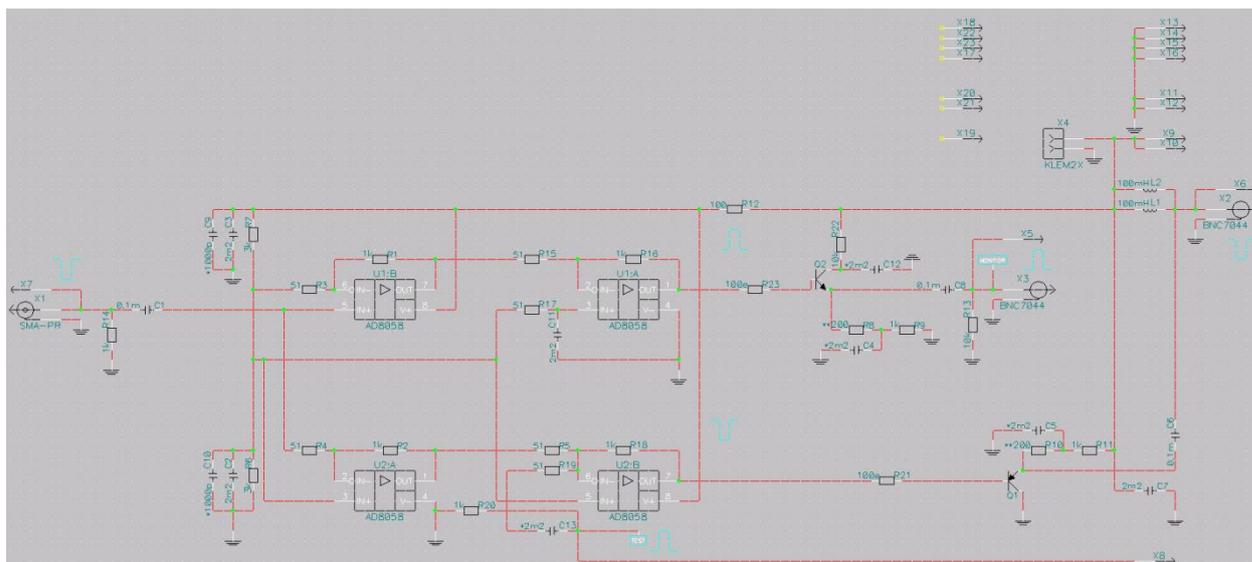


Рисунок 3-19 – схема усилителя ОМ

Передаточные характеристики усилителя иллюстрирует рисунок 3-20. На нем показаны зависимости амплитуды, длительности и заряда выходных сигналов от амплитуды входных сигналов, имитирующих сигнал с ФЭУ (ширина сигнала на полувысоте ~ 15 нс). Усилитель спектрометрического канала ограничивает выходной сигнал на уровне 4 Вольт, приводя его в соответствие с рабочим диапазоном АЦП. Это ограничивает диапазон линейности усилителя по амплитуде. Вне диапазона линейности по амплитуде длительность выходного сигнала растет с амплитудой, обеспечивая сохранение линейности усилительного тракта по заряду. Диапазон линейности по заряду превышает 150 нВ·с, что соответствует ~ 250 ф.э., регистрируемых фотоэлектронным умножителем.

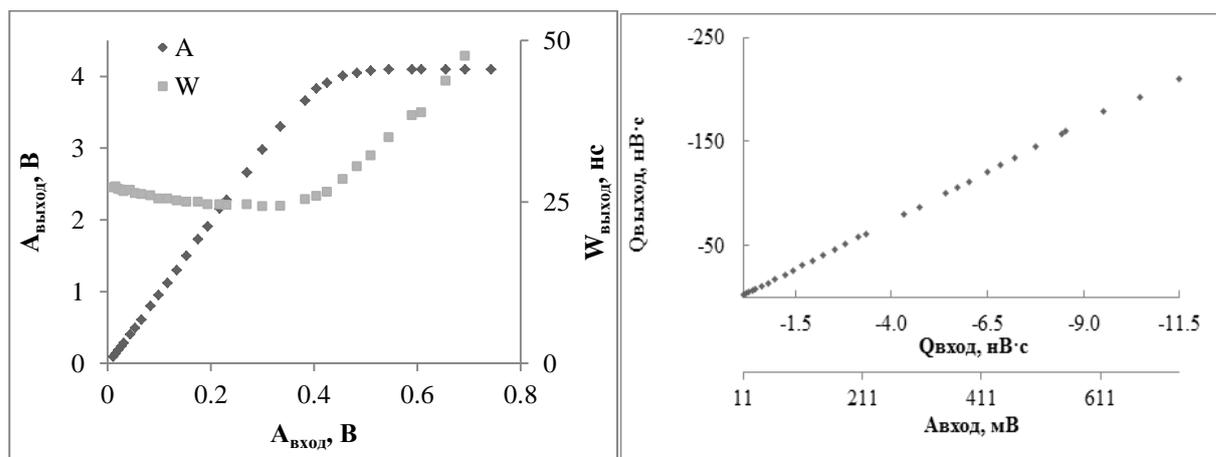


Рисунок 3-20 – типовые зависимости амплитуды (А) и ширины (W) выходного сигнала усилителя от амплитуды входного сигнала (слева) и заряда выходного сигнала от заряда входного сигнала (справа)

На рисунке 3-21 приводится зависимость задержки усилителя от амплитуды входного сигнала. Задержка составляет величину ~ 12 нс и имеет тенденцию к уменьшению при больших амплитудах (в области амплитудной нелинейности).

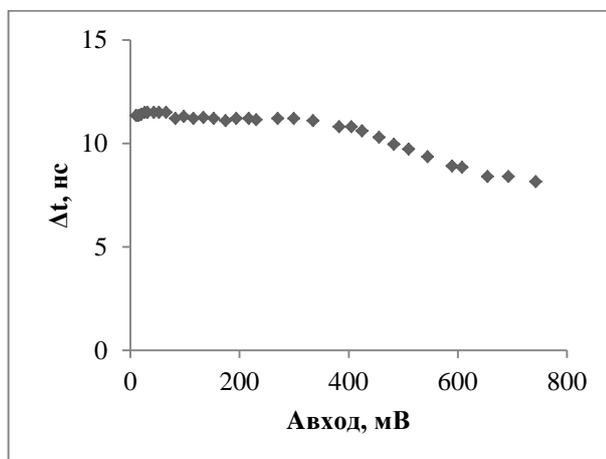


Рисунок 3-21 – типовая зависимость задержки выходного сигнала усилителя от амплитуды входного сигнала

Усилитель сигналов определяет форму выходного импульса ОМ. На форму импульсов, поступающих на АЦП, оказывает влияние также глубоководный кабель, соединяющий ОМ и модуль центра секции (длина кабеля 90 метров). На рисунке 3-22 представлены формы импульсов на выходе кабеля ОМ, соответствующих сигналам в ~ 1 , ~ 22 , ~ 48 и ~ 1140 ф.э. Средние значения параметров этих импульсов представлены в таблице 3-7. В линейной области длительность переднего фронта сигнала составляет величину менее 30 нс и определяется главным образом длительностью переднего фронта усилителя. В нелинейной области работы измерительного канала (больше 10^2 ф.э.) форма сигнала определяется процессами, связанными с насыщением анодного тока ФЭУ и ограничением амплитуды усилителем сигналов на уровне 4 В.

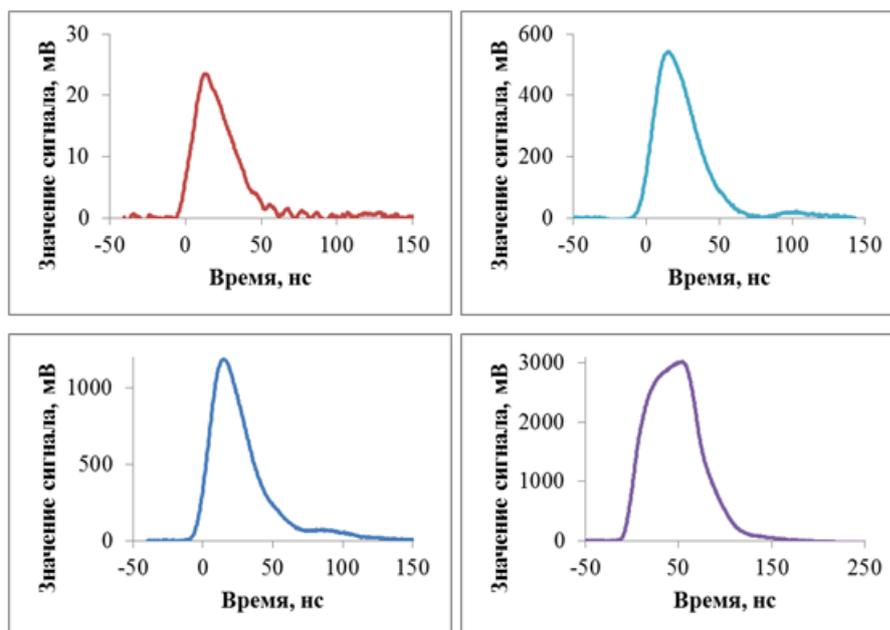


Рисунок 3-22 – формы импульсов ОМ для сигналов, соответствующих ~ 1 ф.э., ~ 22 ф.э., ~ 48 ф.э. и ~ 1440 ф.э.

Таблица 3-7 – средние значения параметров импульсов ОМ

Количество, ф.э.	Амплитуда, мВ	Ширина на полувысоте, нс	Передний фронт (10% – 90%), нс	Задний фронт (10% – 90%), нс
~ 1	23 ± 10	28 ± 7,3	15 ± 5,0	35 ± 16
~ 22	515 ± 119	29,5 ± 0,91	13 ± 1,2	36 ± 5,9
~ 48	1116 ± 183	29,3 ± 0,52	13,6 ± 0,40	35 ± 3,8
~ 720	2962 ± 49	59 ± 1,7	29 ± 1,0	40 ± 4,5
~ 1440	3055 ± 50	73 ± 1,8	32,7 ± 0,85	40 ± 3,3

Важной функцией электроники ОМ является обеспечение проведения временной и амплитудной калибровок каналов, позволяющих преобразовывать измеренные параметры сигналов в количество фотоэлектронов и время их регистрации. 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 (см. рисунок 3-23). Длина волны на максимуме излучения светодиодов составляет 470 нм (см. рисунок 3-24).

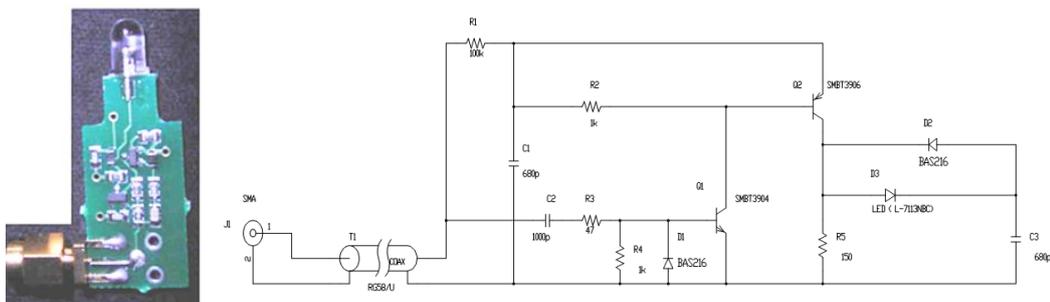


Рисунок 3-23 – фотография (слева) и схема (справа) светодиодного калибровочного источника

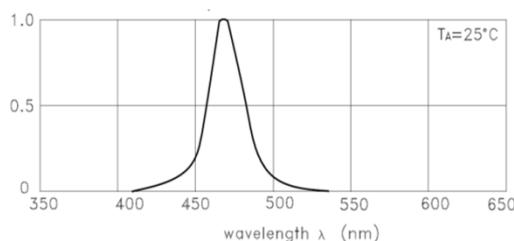


Рисунок 3-24 – зависимость относительной интенсивности излучения светодиода Kingbright L7113 PBC-A от длины волны

Для проверки длительности светового импульса светодиода был собран специальный стенд: патент на полезную модель № 163505. Стенд состоит из следующих компонентов:

- Фотодетектор – быстрый фотоэлектронный умножитель Photonis XP1911 с временем нарастания импульса менее 3 нс, размещенный в светоизолированном боксе.
- Светодиод с драйвером (плата светодиода), помещенный в светозащищенный чехол в механический разъем с возможностью оперативно менять экземпляры светодиодов.
- Световод, закрепленный в стенке бокса. Один конец которого оптически связан с фотодетектором внутри бокса, другой со светодиодом посредством механического разъёма.
- Управляемый высоковольтный источник питания фотодетектора.
- Низковольтный источник питания контролера.
- Цифровой осциллоскоп для записи сигналов фотодетектора.
- Контроллер аналогичный контроллеру ОМ, управляемый с компьютера. Посредством контроллера осуществляется управление низковольтным питанием драйвера светодиода, высоковольтным источником напряжения

фотодетектора, драйвером светодиода и запуском записи сигналов фотодетектора осциллоскопом.

Исследования показали, что длительность светового импульса зависит от партии светодиодов и составляет величину $\sim 5 - 7$ нс (см. рисунок 3-25). 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 ~ 100 нс (точность установки величины задержки ~ 1 нс).

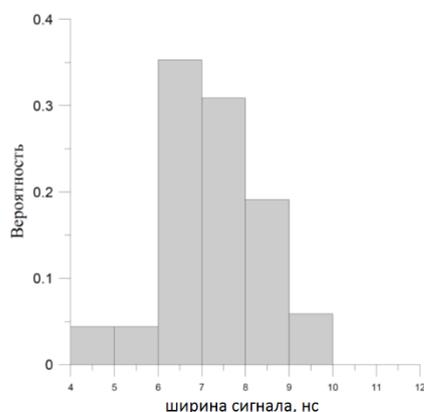


Рисунок 3-25 – распределение по длительности сигналов светодиодов Kingbright L7113 PBC-A

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, синхронизованный 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).

Следует отметить, что возможность принудительного формирования сигналов на выходе ОМ без подачи высоковольтного напряжения на ФЭУ используется также для контроля работоспособности электроники и кабельных коммуникаций секции ОМ после её монтажа, без опускания на глубину полного поглощения дневного света (~ 500 м).

Для амплитудной калибровки канала измеряется однофотозлектронное 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. В области линейности величина параметра R должна быть равна единице (систематическая ошибка определяется величиной перекрестных наводок каналов). Данный подход позволяет осуществлять контроль линейности каналов при работе ОМ в составе телескопа.

Система управления оптическими модулями разработана на основе микроконтроллера SiLabs C8051F121. В функции микроконтроллера входит управление напряжением на делителе ФЭУ; регулировка частоты запусков, интенсивности свечения и задержки светодиодных источников света; формирование синхроимпульса для временной калибровки; 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.

Для мониторинга скорости счета шумов ФЭУ в контроллер ОМ встроен счетчик наносекундных импульсов. Контроллер позволяет регулировать длительность временного окна для подсчета количества шумовых импульсов, интервал между измерениями в диапазоне от единиц миллисекунд до 10 с и порог регистрации счетчика. Минимальный

рабочий порог ограничен амплитудой наводки от процессора контроллера ОМ и составляет величину ~ 10 мВ ($\sim 0,3$ ф.э.).

Управление контроллером ОМ осуществляется по линии связи (линии управления), организованной на базе интерфейса RS-485. Шина передачи данных позволяет обеспечить надёжную связь центральных узлов секции телескопа с ОМ на расстояниях до сотен метров (размер секции ~ 200 м).

§ 4. Угловая зависимость отклика ОМ

Конструкция ОМ и тип используемого ФЭУ определяют угловую зависимость отклика ОМ на излучение. Информация о зависимости отклика ОМ от угла падения света на фотокатод ФЭУ необходима для моделирования отклика установки. Для измерения этой характеристики использовался автоматизированный стенд, обеспечивающий поворот ОМ на заданный угол при помощи шагового двигателя. Стенд располагался в свето-изолированном помещении. Оптический модуль размещался в баке с водой для исключения искажений угловой характеристики, связанных с отражением и преломлением света, и выдерживался в темноте не менее 12 часов. Фотокатод ФЭУ засвечивался плоскопараллельным потоком света от синего светодиода Kingbright L7113, размещаемого на расстоянии 3 метра от исследуемого модуля и работающего в импульсном режиме (длительность импульса ~ 5 нс). Измерялся заряд импульсов ФЭУ, инициированных вспышками светодиода. Зависимость отклика ОМ от угла падения света на фотокатод представлена на рисунке 3-26. Для оценки систематической погрешности, которая может быть связана с нестабильностью интенсивности свечения светодиода, измерения проводились для трех последовательных полных поворотов ОМ относительно источника света. Для максимальных углов поворота ОМ (фотокатод ориентирован в направлении противоположном источнику света) на точность измерений влияет отражение от светопоглощающего материала, расположенного на дальней по отношению к источнику стенке бака (до 10 % от измеренного сигнала).

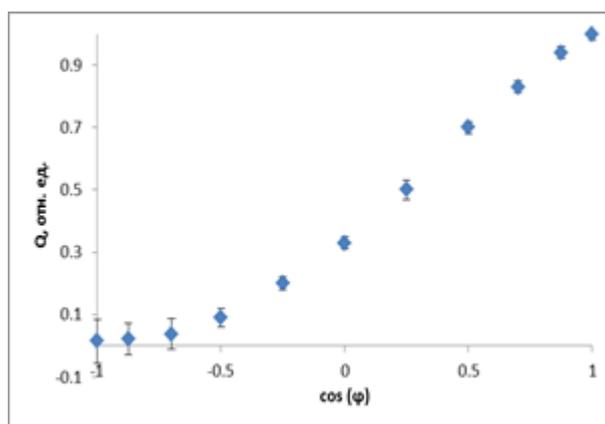


Рисунок 3-26 – зависимость отклика ОМ от угла падения света на фотокатод φ

§ 5. Основные характеристики ОМ Baikal-GVD

Оптические модули нейтринного телескопа Baikal-GVD были разработаны, исходя из технических особенностей системы сбора данных установки Baikal-GVD и общих требований, предъявляемых к фотодетекторам нейтринных телескопов. В таблице 3-8 представлены основные характеристики оптического модуля Baikal-GVD.

Таблица 3-8 – основные характеристики ОМ Baikal-GVD

Характеристика	Значение
Корпус	VITROVEX 17"
Показатель преломления стекла корпуса	1,47
Разъем	SUBCONN LPBH5FSS, 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

Характеристика	Значение
Сопротивление делителя напряжения (пассивный делитель)	18 МОм
Параметры выходного сигнала: передний фронт	12 нс
длительность импульса (область линейности)	25 нс
однофотоэлектронная 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 °С
Температура хранения	-40 ... +40 °С

Характеристики оптических модулей соответствуют всем требованиям, предъявляемым к фотодетекторам установки (см. главу 2 «Требования к ОМ Байкал-GVD»). Они отличаются простотой сборки и удобством монтажа на гирлянды в оз. Байкал.

Глава 4. Исследования параметров

На всех этапах анализа экспериментальных данных (моделировании отклика детектора, статистической обработке данных, отборе и восстановлении параметров физических событий) требуется полная информация о характеристиках измерительных каналов установки. Характеристики каналов, в первую очередь, определяются значениями временных, амплитудных и шумовых параметров оптических модулей. Основной целью исследований ОМ являлось создание банка данных параметров оптических модулей установки.

Задачами исследования являлись разработка автоматизированной системы измерения параметров ОМ, измерение характеристик всех оптических модулей перед их установкой в оз. Байкал (паспортизация ОМ), статистический анализ полученных результатов и унификация измерительных каналов (подбор величины напряжения на ФЭУ, обеспечивающего значение коэффициента усиления канала на уровне 10^8). При исследовании характеристик ОМ проводятся серии достаточно длительных измерений во всех режимах работы оптического модуля. Поэтому, в качестве одной из основных, ставилась задача проверки работоспособности ОМ.

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

§ 1. Стенд для исследований и паспортизации ОМ

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 была полностью автоматизирована.

Аппаратное оснащение стенда

Схема стенда для комплексной проверки ОМ и фотография светоизолированного бокса для размещения оптических модулей представлены на рисунках: 4-1 и 4-2. Измерительная система стенда организована на базе цифрового осциллографа высокого разрешения HDO 4034 компании Teledyne LeCroy с встроенным компьютером, работающим под управлением операционной системы семейства Windows. Основные характеристики осциллографа приведены в таблице 4-1.

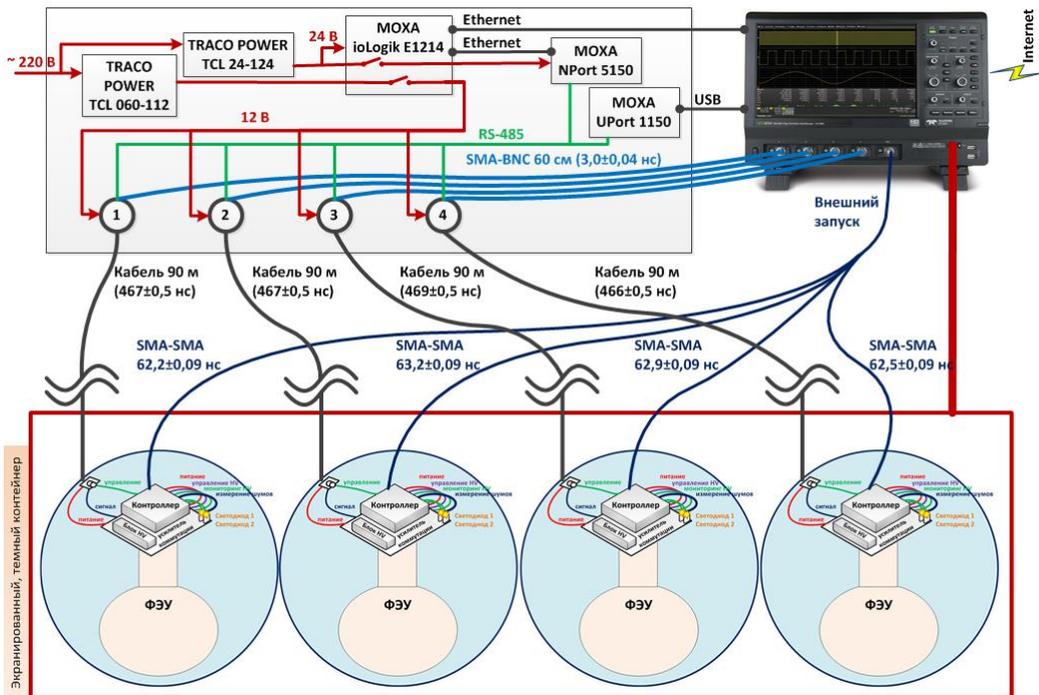


Рисунок 4-1 – схема стенда для комплексной проверки ОМ



Рисунок 4-2 – фотография стенда

Таблица 4-1 – основные характеристики осциллографа LeCroy HDO 4034

Характеристики	Параметр	Значение
КАНАЛ ВЕРТИКАЛЬНОГО ОТКЛОНЕНИЯ	Количество каналов	4
	Полоса пропускания (-3 дБ)	350 МГц
	Время нарастания	1 нс
	Ограничение полосы	20, 200 МГц
	Коэф. отклонения ($K_{откл.}$)	50 Ом: 1 мВ/дел...1 В/дел; 1 МОм: 1 мВ/дел...10 В/дел
	Погрешность установки $K_{откл.}$	$\pm 0,5 \%$
	Погрешность уст. смещения	$\pm (1 \% + 0,5\%$ от полной шкалы $+ 0,02\%$ от макс. смещ. $+ 1$ мВ)
КАНАЛ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ОТКЛОНЕНИЯ	Коэф. развертки ($K_{разв.}$)	200 пс/дел...2500 с/дел
	Погрешность установки $K_{разв.}$	$\pm 2,5 \times 10^{-6}$
	Диапазон внутренней синхронизации	$\pm 4,1$ делений от центра
АНАЛОГО- ЦИФРОВОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ	Разрешение по вертикали	12 бит (15 бит в режиме увеличенного разрешения);
	Макс. частота дискретизации (покадровый режим)	2,5 ГГц/канал
	Программное обеспечение	Платформа на базе ОС WIN 7 (64 bit). Возможность интеграции с пакетами MathCad, MatLab, Excel.

Четыре ОМ помещаются в экранированные, светоизолированные контейнеры. Каждый модуль подключается посредством кабелей длиной 90 м через глубоководные разъемы и переходные платы, обеспечивающие подключение коаксиального кабеля к разъемам. В стенде используются кабели, разъемы и коммутационные платы, того же типа, как и в нейтринном телескопе.

Для измерения параметров ОМ используются импульсные светодиодные источники, установленные в исследуемом модуле (длительность импульса ~ 5 нс) с регулируемым уровнем интенсивности свечения. Следует подчеркнуть, что от светодиодных источников не требуется формирования световых импульсов заданной интенсивности. Методика измерения параметров ОМ базируется на использовании световых импульсов, генерирующих заданное количество фотоэлектронов, выбиваемых из фотокатода ФЭУ. Такой подход существенно упрощает аппаратную реализацию

светодиодной калибровочной системы, позволяя, в то же время, провести измерения практически всех параметров оптического модуля. Единственное исключение составляет измерение квантовой эффективности фотокатода, информация о которой предоставляется производителем ФЭУ.

Сигнал на вход осциллографа передаётся по SMA-BNC коаксиальным кабелям подобным тем, что используются в ОМ. Выход внешней синхронизации контроллеров ОМ подключен к входу синхронизации осциллографа посредством SMA-SMA коаксиальных кабелей. Все кабельные задержки представлены на схеме стенда. Величины задержек могут меняться в зависимости от уровня порога измерения сигналов в пределах нескольких наносекунд. В данном случае измерение задержек производилось на полувысоте сигнала генератора.

Электропитание ОМ осуществлялось от источника TRACO POWER TCL 060-112, который используется для электропитания оптических модулей в нейтринном телескопе. Управление работой оптических модулей осуществлялось по последовательному интерфейсу RS-485 через 1-портовой асинхронный сервер RS-232/422/485 NPort 5150 компании MOXA по сети Ethernet по протоколу TCP/IP встроенным компьютером осциллографа. Дополнительно, для работы в режиме отладки, к шине RS-485 подсоединен преобразователь UPort 1150 подключаемый к USB-порту компьютера осциллографа. UPort 1150 позволяет в ручном режиме управлять работой ОМ и контролировать качество линии связи с оптическим модулем.

Стенд оснащен Ethernet-модулем ввода/вывода ioLogik E1214 компании MOXA с шестью дискретными вводами и шестью реле. Через один канал модуля ioLogik осуществляется удаленное управление электропитанием и инициализация контроллеров ОМ. По другому каналу осуществляется включение электропитания аппаратуры, управляющей работой стенда, и ее перезагрузка. Перезагрузка требуется при возникновении сбоев в работе стенда вследствие ошибок при подключении оптического модуля (скачков напряжения). Устройство ioLogik E1214 имеет встроенный 2-портовый Ethernet-коммутатор, что позволяет объединить его в цепочку с устройством NPort 5150 и подключать оба устройства к одному порту LAN осциллографа, формируя локальную вычислительную сеть стенда. Второй порт LAN осциллографа подключен к сети Internet, что обеспечивает возможность удаленного управления работой стенда.

Электропитание NPort 5150 и ioLogik E1214 осуществляется напряжением 24 В через источник питания TCL 24-124 компании TRACO POWER. Питание устройства UPort 1150 осуществляет через USB- интерфейс.

Программное обеспечение стенда

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.

Разработанное программное обеспечение адаптировано для работы на 32 и 64 разрядных операционных системах семейства Windows версии XP (и старше) и Microsoft Excel версии 2003 (и старше).

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

Диаграмма классов представлена на рисунке 4-3. Главным классом является "Test facility", которые хранит в себе две характеристики стенда (задержка сигнала в кабелях стенда и признак, что выход синхронизации ОМ подключен к входу внешней синхронизации осциллографа) и компоненты: осциллограф (Oscilloscope), оптический модуль (Optical module), медленная линия связи RS-485 (SlowCommunicationsLink), Ethernet-клиент (EthernetClient), посредством которого происходит подключение к серверу RS-232/422/485 NPort 5150 и трансляция посылок медленной линии связи RS-485 по Ethernet-сети между осциллографом и NPort 5150, и процедуры калибровки (Calibration). Объект Calibration использует объекты: Oscilloscope и Optical module. В свою очередь объект Optical module использует объект SlowCommunicationsLink для отправки и получения посылок по медленной линии связи RS-485. SlowCommunicationsLink использует EthernetClient, который в свою очередь использует библиотеку CSC4VB через интерфейс, описанный в модуле CSC32.

Для иллюстрации работы программного обеспечения представлены алгоритмы двух процедур, используемых в процессе измерения параметров оптических модулей:

процедура настройки диапазонов измерений и процедура подбора кода управления светодиодом для обеспечения заданной величины сигнала ФЭУ.

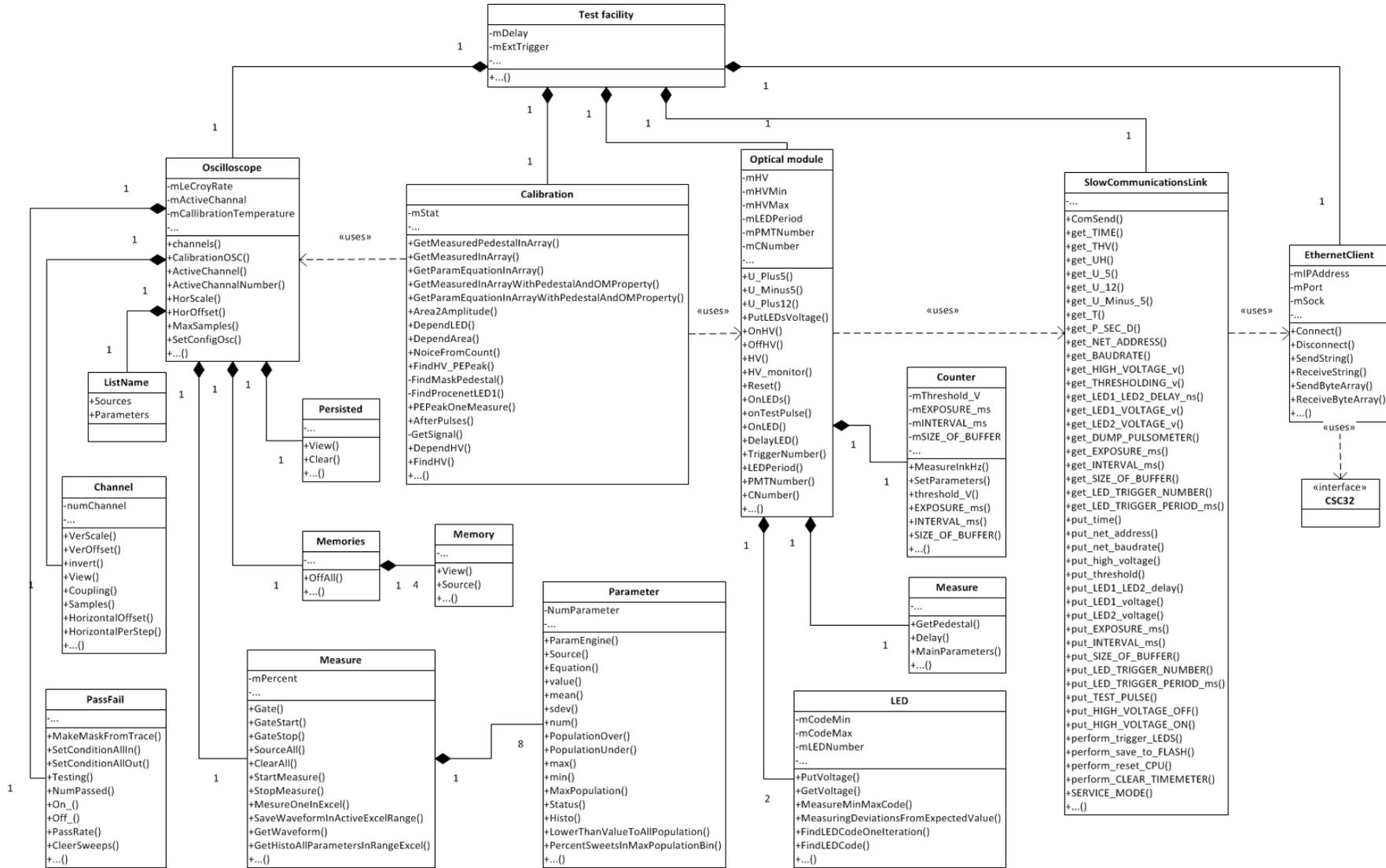


Рисунок 4-3 – UML-диаграмма классов Программы для калибровки ОМ нейтринного телескопа Baikal-GVD (SCOM)

Процедура настройки диапазона измерений

Перед началом испытаний оптического модуля проводится серия предварительных измерения, позволяющих определить граничные значения индивидуальных параметров ОМ (интенсивность свечения светодиодов, величину высоковольтного напряжения), что уменьшает продолжительность дальнейших процедур. Алгоритм процедуры настройки диапазона измерений представлен на рисунке 4-4. Продолжительность процедуры не превышает двух минут.

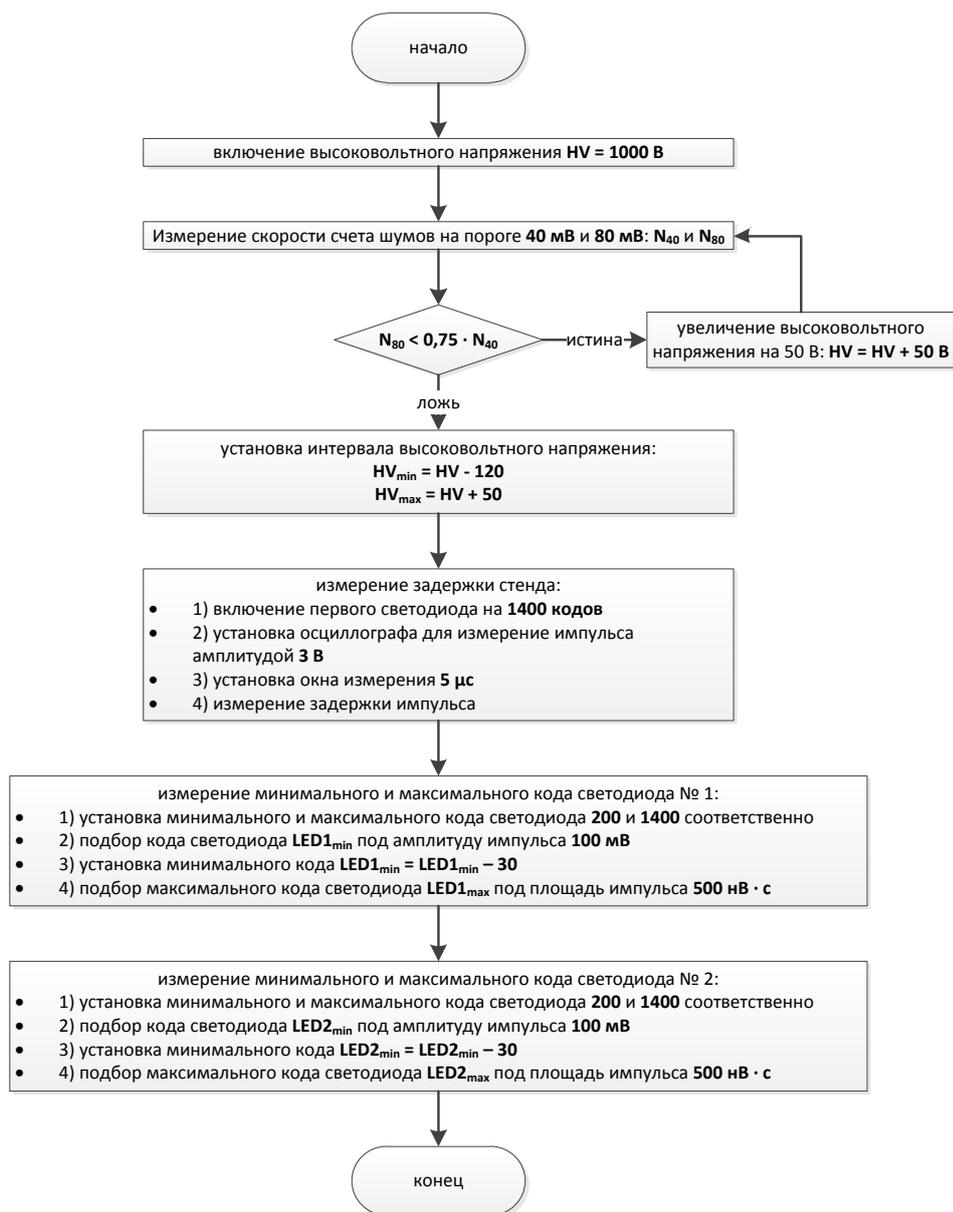


Рисунок 4-4 – алгоритм настройки диапазонов измерений

Процедура подбора кода светодиодов

Как указывалось выше, методика измерения параметров ОМ базируется на использовании световых импульсов, генерирующих заданное количество фотоэлектронов,

выбываемых из фотокатода ФЭУ. Регулировка интенсивности излучения светодиода осуществляется при помощи изменения напряжения в диапазоне от 0 до 12 В, подаваемого на драйвер светодиодного источника. Величина управляющего напряжения задается кодом цифро-аналогового преобразователя контроллера ОМ. Предусмотрено ~ 1500 градаций управляющего напряжения, позволяющего регулировать интенсивность излучения в диапазоне от единиц до $\sim 10^8$ фотонов. В дальнейшем для обозначения величины кода напряжения, управляющего светодиодным драйвером, будет использоваться достаточно широко используемый термин: код светодиода.

Подбор кода светодиода, обеспечивающего заданный отклик ФЭУ (величину заряда или амплитуды сигнала) одна из наиболее используемых процедур программы, время её выполнения вносит существенный вклад в общее время измерения параметров ОМ. Требуемая точность подбора кода светодиода является параметром алгоритма поиска и, в зависимости от типа измеряемых параметров ОМ, может варьироваться от десятков до единиц процентов.

Стоит обратить внимание, что функция отклика ФЭУ на засветку от светодиода не является монотонно возрастающей (чем больше код светодиода, тем больше заряд сигнала-отклика ФЭУ). При слабых подсветках (единицы фотоэлектронов) увеличение интенсивности свечения приводит не к увеличению величины сигнала отклика ФЭУ, а к увеличению вероятности его возникновения. Кроме того, вклад шумовых импульсов ФЭУ может исказить результаты измерения величины отклика ФЭУ на светодиодный сигнал. Следует также принимать во внимание, что использование сигналов разной амплитуды требует изменения масштаба измерений осциллографа, что приводит к изменению абсолютной ошибки измерения.

Для подбора кода светодиода используется итерационный алгоритм по методу золотого сечения. Алгоритм процедуры подбора кода светодиода представлен на рисунке 4-5. Для экономии времени выполнения процедуры поиска, измерения осуществляются в три этапа: с точностью 15 кодов светодиода и сниженной в четыре раза статистикой измерений; с точностью 4 кода и сниженной в два раза статистикой; с точностью 1 код и полной статистикой. Статистика выбирается исходя из требуемой точности подбора величины отклика ОМ.

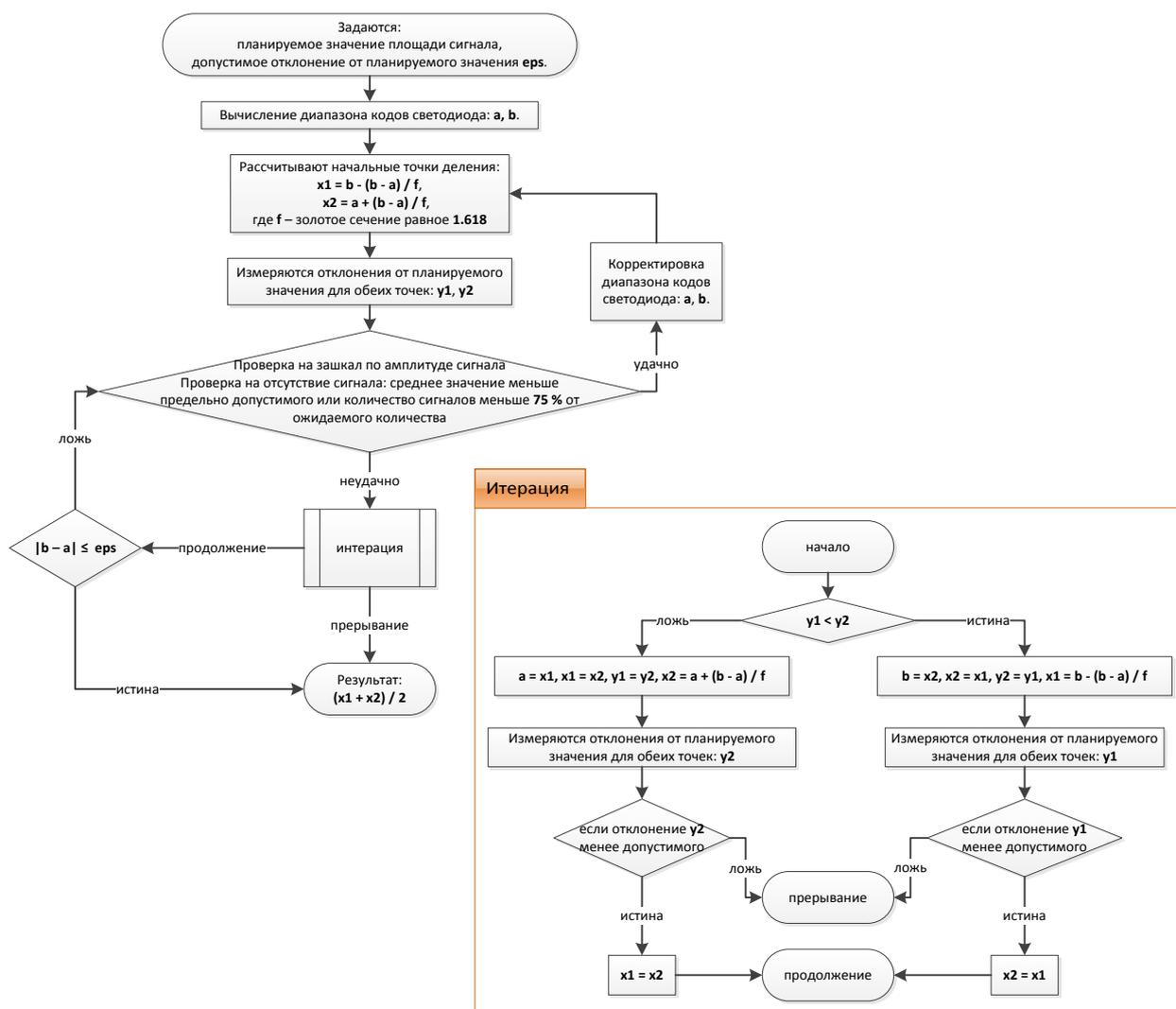


Рисунок 4-5 – алгоритм подбора кода светодиода

§ 2. Исследование параметров ОМ

Методика исследований параметров оптических модулей была разработана с учетом требования проведения измерения параметров всех ОМ [84, 85], которые войдут в состав нейтринного телескопа. Учитывая их значительное количество (более 2000 ОМ только на первом этапе развертывания установки) процедура измерений была полностью автоматизирована (проведение измерений “вручную” осуществлялось только для выборочных экземпляров ОМ в целях отладки методики измерений и их алгоритмов). Данные, полученные в результате автоматизированных измерений параметров ОМ, заносились в таблицы EXCEL для их последующего статистического анализа и паспортизации оптических модулей.

Для проведения лабораторных исследований ОМ размещался в экранированном, светоизолированном контейнере и подключался к анализатору импульсов (цифровому

осциллографу). Следует подчеркнуть, что параметры измерительно канала определяются не только характеристиками оптического модуля, но и свойствами кабельной линии, связывающей ОМ с аналогово-цифровым преобразователем. Все исследования, представленные в данной главе, если не оговорено отдельно, проводились в условиях подключения выхода ОМ к входу анализатора импульсов при помощи 90-метрового кабеля и разъемов, аналогичных используемым в реальном эксперименте. В дальнейшем, под параметрами ОМ следует понимать параметры канала, включающего в свой состав оптический модуль и 90-метровый кабель.

Модуль выдерживался в темноте при включенном высоковольтном напряжении, вплоть до снижения уровня шумов до приемлемого для последующих измерений уровня ~ 10 кГц, после чего запускалась процедура измерений, которая занимала в среднем 2,5 часа на один ОМ.

Полная проверка ОМ состоит из измерения зависимостей и гистограмм в различных режимах работы ОМ и вычисления по этим измерениям параметров ОМ. При измерении любой зависимости от какой-либо величины сохраняются таблицы данных со следующими параметрами сигналов: площадь, амплитуда, задержка и длительность сигнала, его максимальное значение, ширина переднего фронта на уровнях 10 – 90 % и 20 – 80 %, заднего фронта на уровнях 10 – 90 %, пьедестал сигнала. Для каждого параметра сохраняется его среднее значение, стандартное отклонение и статистическая обеспеченность измерения. В некоторых измерениях также могут сохраняться гистограммы параметров, формы сигналов или результаты их предварительной обработки.

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 (однофотозлектронный режим работы ФЭУ);
- измерение зависимости параметров ОМ от уровня подсветки ФЭУ (многофотозлектронный режим работы ФЭУ);
- измерение параметров вспомогательных систем ОМ: формирователя проверочных импульсов и счетчика срабатываний канала;
- измерение послеимпульсов;
- измерение кривой насыщения.

Зависимость параметров ОМ от величины высоковольтного напряжения

Зависимость от высоковольтного напряжения исследовалась для следующих параметров ОМ: коэффициента усиления, длительности и задержки импульсов. Для проведения измерений подбирался уровень световых сигналов, соответствующих амплитуде на выходе ОМ равной ~ 250 мВ при величине высоковольтного напряжения ФЭУ 1300 В (средняя величина напряжения по данным производителя). Величина высоковольтного напряжения варьировалась в диапазоне от 1100 до 1800 В с шагом 100 В. Измерения параметров ОМ производились для каждого значения напряжения.

Коэффициент усиления ОМ определялся косвенным методом (результаты прямого измерения усиления ОМ представлены в следующем параграфе). При расчете усиления ОМ предполагалась независимость умножения электронов для каждого ф.э. (это справедливо в линейной области работы ФЭУ). В этом случае заряд на выходе ОМ (Q) пропорционален количеству ф.э. ($N_{фэ}$), излучаемых фотокатодом под действием оптического излучения, и величине заряда, образованного одним фотоэлектроном ($Q_{офэ}$): $Q = N_{фэ} \cdot Q_{офэ}$. В свою очередь дисперсия многофотоэлектронного (далее м.ф.э.) сигнала складывается из суммы дисперсий умножения заряда $\sigma_{офэ}^2$, вызванных каждым ф.э., и разбросу количества ф.э., которая равна квадратному корню из количества ф.э. $\sqrt{N_{pe}}$ (поток частиц подчиняется закону Пуассона):

$$\begin{aligned} \sigma_{мфэ}^2 &= \left(\sqrt{N_{фэ}} \cdot Q_{офэ} \right)^2 + \sum_{i=0}^{N_{pe}} \sigma_{офэ}^2 = \left(\sqrt{N_{фэ}} \cdot Q_{офэ} \right)^2 + N_{фэ} \cdot \sigma_{офэ}^2 \\ &= N_{фэ} \cdot (Q_{офэ}^2 + \sigma_{офэ}^2). \end{aligned} \quad (4-1)$$

Взяв отношение указанных соотношений, получаем:

$$\frac{\sigma_{мфэ}^2}{Q} = \frac{N_{фэ} \cdot (Q_{офэ}^2 + \sigma_{офэ}^2)}{N_{фэ} \cdot Q_{офэ}} = \frac{Q_{офэ}^2 \cdot \left(1 + \left(\frac{\sigma_{офэ}}{Q_{офэ}} \right)^2 \right)}{Q_{офэ}} = Q_{офэ} \cdot \left(1 + \left(\frac{\sigma_{офэ}}{Q_{офэ}} \right)^2 \right). \quad (4-2)$$

И тогда заряд, собранный на аноде от одного ф.э., составит:

$$Q_{офэ} = \frac{\sigma_{мфэ}^2}{Q \cdot \left(1 + \left(\frac{\sigma_{офэ}}{Q_{офэ}} \right)^2 \right)} = \frac{\sigma_{мфэ}^2}{Q \cdot (1 + \delta^2)}, \quad (4-3)$$

где $\delta = \left| \frac{\sigma_{\text{офэ}}}{Q_{\text{офэ}}} \right|$ – о.ф.э. разрешение ФЭУ.

В реальности, вместо заряда будем измерять площадь сигнала в [В·с]. И тогда,

$$k_{\text{усил.}} = \frac{\Delta Q}{q_e} = \frac{I \cdot \Delta t}{q_e} = \frac{U \cdot \Delta t}{R \cdot q_e} = \frac{S_{\text{офэ}}}{R \cdot q_e} = \frac{\sigma_{\text{мфэ}}^2}{S \cdot (1 + \delta^2) \cdot R \cdot q_e}, \quad (4-4)$$

где R – сопротивление 50 Ом, q_e – заряд электрона $-1,6 \cdot 10^{-19}$ К, А и $\sigma_{\text{мфэ}}$ – среднее значение и стандартное отклонение площади сигнала в [В·с].

Не сложно показать, что количество ф.э.:

$$N_{pe} = \frac{S^2}{\sigma_{\text{офэ}}^2} \cdot (1 + \delta^2). \quad (4-5)$$

Таким образом, коэффициент усиления вычисляется по следующей формуле:

$$k_{\text{усил.}} = \frac{(\sigma_{\text{мфэ}}^2 - \sigma_{\text{п}}^2)}{(1 + \delta^2) \cdot (S_{\text{мфэ}} - S_{\text{п}}) \cdot R \cdot q_e}, \quad (4-6)$$

где $S_{\text{мфэ}}$ и $\sigma_{\text{мфэ}}$ – среднее значение и стандартной отклонение площади сигнала в [В·с], $S_{\text{п}}$ и $\sigma_{\text{п}}$ – среднее значение и стандартной отклонение пьедестала в [В·с].

О.ф.э. разрешение ФЭУ, которое измеряется по о.ф.э. спектру:

$$\delta = \frac{\sqrt{\sigma_{SPE}^2 - \sigma_{ped}^2}}{(A_{SPE} - A_{ped})}, \quad (4-7)$$

где $S_{\text{офэ}}$ и $\sigma_{\text{офэ}}$ – среднее значение и стандартной отклонение площади о.ф.э. сигнала в [В·с]. В данном измерении используется усредненное значение для большинства ОМ, которое уточняется на следующем измерении: характеристики ОМ в о.ф.э. режиме.

На рисунке 4-6 представлены зависимости коэффициента усиления ОМ в зависимости от величины высоковольтного напряжения для 87 ОМ. Как видно из графика, коэффициент усиления при одном и том же напряжении сильно отличается для разных экземпляров ОМ. Этот эффект связан с большим разбросом коэффициентов усиления ФЭУ, установленных в оптических модулях. В частности, для достижения требуемой величины усиления канала 10^8 , напряжение на ФЭУ необходимо варьировать в достаточно широком диапазоне (от 1100 до 1700 В).

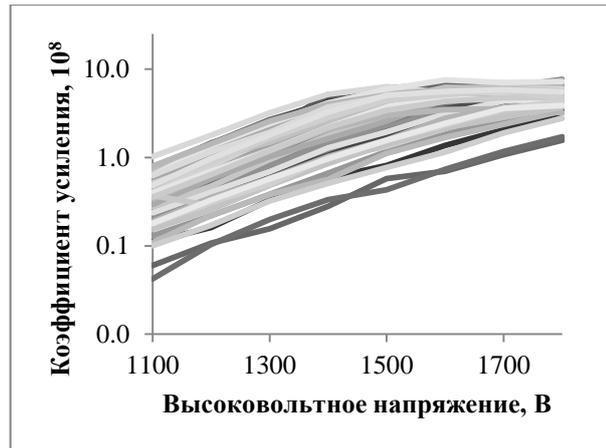


Рисунок 4-6 – зависимость коэффициентов усиления ОМ от величины напряжения на ФЭУ для 87 ОМ

При увеличении напряжения на ФЭУ на 100 В, коэффициент усиления ОМ в среднем увеличивается более чем в полтора раза ($1,67 \pm 0,028$). Предельное значение усиления ОМ составляет $\sim 5 \cdot 10^8$. Данное ограничение вызвано насыщением усилительного тракта.

Зависимость длительности сигнала ОМ (ширины сигнала на уровне полувысоты) от высоковольтного напряжения представлена на рисунке 4-7. Средняя длительность сигнала составляет $32 \pm 1,6$ нс. Наблюдается уменьшение длительности сигнала с ростом величины высоковольтного напряжения в диапазоне 1200 – 1500 В в среднем на $0,5 \pm 0,15$ нс на 100 В. При высоких значениях высоковольтного напряжения наблюдается значительное уширение сигнала вследствие насыщения усилительного тракта.

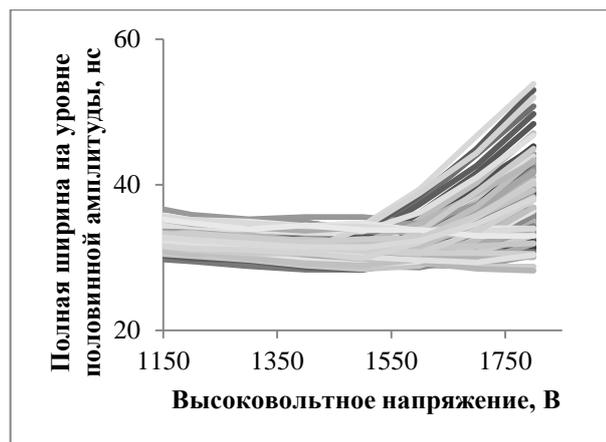


Рисунок 4-7 – зависимость длительности сигнала ОМ от высоковольтного напряжения

Зависимость задержки сигнала в ОМ от высоковольтного напряжения для 59 ОМ представлена на рисунке 4-8. В данном случае задержка сигнала в ОМ измерялась как разница между сигналом с ФЭУ, инициированным светодиодом, и проверочным

импульсом. Измерение времени регистрации импульсов производилось на уровне порогов, равном половине амплитуды сигналов. Задержка сигнала уменьшается с ростом величины высоковольтного напряжения в диапазоне 1200 – 1500 В среднем на $2,2 \pm 0,26$ нс на 100 В.

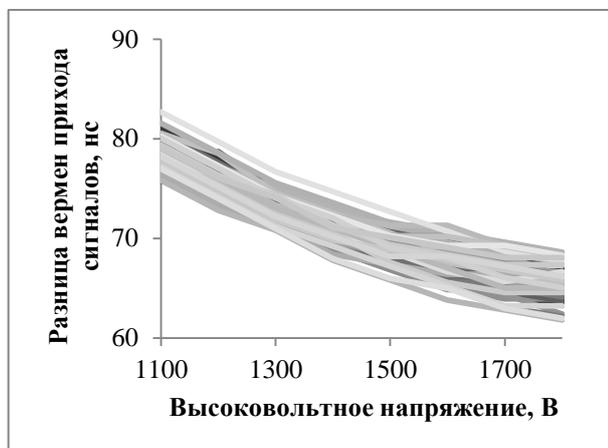


Рисунок 4-8 – зависимость задержки сигналов в ОМ от высоковольтного напряжения ФЭУ

Результаты измерения всех параметров заносились в таблицы EXCEL для формирования паспорта ОМ.

Характеристики ОМ в однофотозлектронном режиме работы

Однофотозлектронный режим работы ОМ подразумевает, что при регистрации светового сигнала вероятность выбивания из фотокатода ФЭУ более одного фотозлектрона мала (обычно считается, что эта вероятность должна быть меньше 10 %). В этом режиме работы на измерение характеристик ОМ не оказывает влияние сложение сигналов от нескольких фотозлектронов, что позволяет измерять такие характеристики ОМ как параметры о.ф.э. спектра (среднее значение, разрешение, отношение пик/долина), временное разрешение канала, форму о.ф.э. сигналов. Кроме того, в этом режиме работы возможно прямое измерение зависимости коэффициента усиления ОМ (K_{yc}) от напряжения на ФЭУ и подбор требуемой величины напряжения, обеспечивающей $K_{yc} = 10^8$.

В однофотозлектронном режиме работы амплитуды сигналов ОМ составляют в среднем ~ 30 мВ и сопоставимы с амплитудой шумов электроники и электромагнитных наводок. Шумы электроники представлены на рисунке 4-9 и состоят из сетевой гармоник пик-пик ~ 6 мВ, 50 Гц и электромагнитных наводок пик-пик ~ 22 мВ, ~ 20 МГц, с длительностью пакета ~ 150 нс.

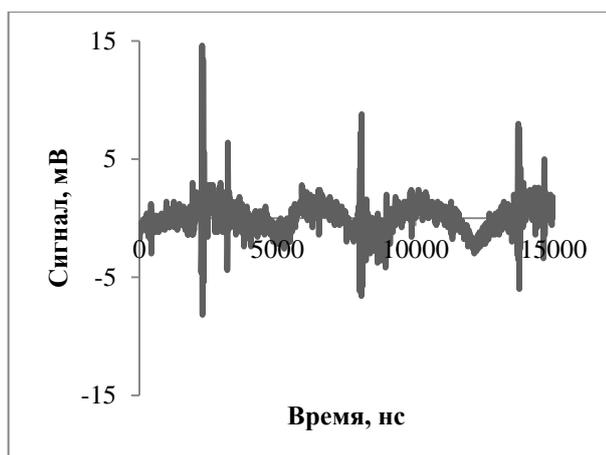


Рисунок 4-9 – шумы электроники стенда

Для выделения чистых о.ф.э. сигналов использовалась специальная методика “фильтрации шумов”. На канале осциллографа устанавливается маска по времени и амплитуде 18 нс x 13 мВ, как показано на рисунке 4-10. Амплитудные границы маски выступают на 5 мВ вверх и на 8 мВ вниз от пьедестала (~ 0,2 амплитуды о.ф.э. импульса). Временные границы маски сдвигаются на 30 нс от переднего фронта усреднённого о.ф.э. сигнала. О.ф.э. сигналы отбираются при условии, что они не пересекают границы маски. Указанный способ фильтрация надёжно отбирает полезные сигналы, достаточно эффективно подавляя шумовые импульсы.

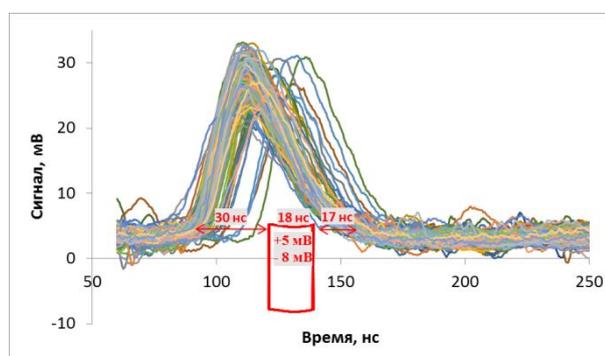


Рисунок 4-10 – методика отбора о.ф.э. импульсов по значениям сигнала в определенном временном окне (фильтрация шумов)

Для исследования параметров ОМ необходимо установить штатное значение высоковольтного напряжения на ФЭУ, соответствующее коэффициенту усиления канала на уровне 10^8 . Как указывалось выше, это соответствует коэффициенту усиления диодной системы ФЭУ $\sim 10^7$. Усиление каналов определялось в режиме о.ф.э. подсветки светодиодом (код светодиода подбирался таким образом, чтобы вероятность регистрации сигнала составляла $\sim 7\%$). Измерения проводились в режиме запуска осциллографа от генератора импульсов светодиодов. Оценка величины пьедестала и вклада шумов канала

выполнялась также в режиме запуска от генератора импульсов при выключенных светодиодах. В процессе измерения формировался о.ф.э. зарядовые распределения и вычислялись средние значения и дисперсии о.ф.э. сигнала и пьедестала.

Коэффициент усиления и о.ф.э. разрешение ФЭУ вычислялись по следующим формулам:

$$k_{\text{усил.}} = \frac{(Q_{SPE} - Q_{ped})}{R \cdot q_e}, \quad \delta = \frac{\sqrt{\sigma_{SPE}^2 - \sigma_{ped}^2}}{(Q_{SPE} - Q_{ped})}, \quad (4-8)$$

где Q_{SPE} и Q_{PED} – средние заряды о.ф.э. спектра и пьедестала, σ_{SPE} и σ_{PED} – их среднестатистические отклонения, q_e – заряд электрона, R – сопротивление 50 Ом.

Подбор величины высоковольтного напряжения осуществлялся по методу золотого сечения (подобно подбору кода светодиодов, см. раздел «Процедура подбора кода светодиодов»). На рисунке 4-11 представлено распределение каналов по выбранному коэффициенту усиления. Стоит отметить, что подбор величины высоковольтного напряжения по однофотоэлектронному спектру позволил улучшить точность подбора с $\sim 10\%$ (см. предыдущий раздел «Зависимости параметров ОМ от величины высоковольтного напряжения») до не менее 1%. Поскольку при установке ОМ в состав детектора будет использоваться другая глубоководный кабель, то точность будет несколько хуже. Усиление каналов на уровне $\sim 10^8$ достигается при величине напряжения в диапазоне от 1150 до 1750 В для исследованной партии ФЭУ (87 штук).

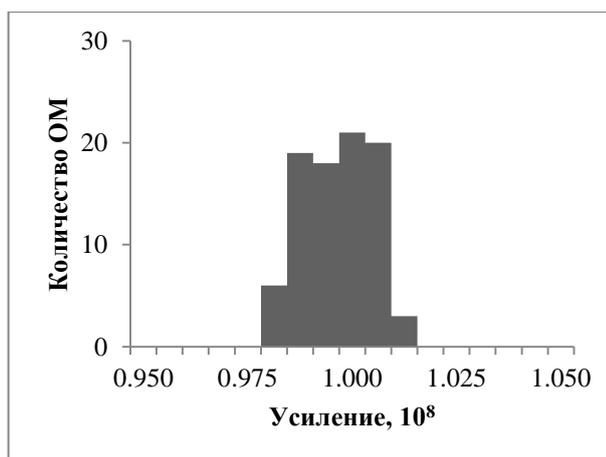


Рисунок 4-11 – распределение каналов по выбранному коэффициенту усиления

Характерное о.ф.э. зарядовое распределение при коэффициенте усиления ОМ $\sim 1 \times 10^8$ и распределение пьедестала представлены на рисунке 4-12. На о.ф.э. спектре первый пик соответствует распределению величины пьедестала, измеренного при выключенном светодиоде, и второй пик соответствует распределению

однофотоэлектронных импульсов ФЭУ, выделенных при регистрации вспышек, генерируемых светодиодом. По полученным о.ф.э. распределениям вычислялось разрешение однофотоэлектронного спектра. Распределение оптических модулей по величине однофотоэлектронного разрешения представлено в правой части рисунка 4-12. Среднее о.ф.э. разрешение составило величину $0,44 \pm 0,03$. Следует отметить, что при выбранном режиме измерений (вероятность регистрации сигнала $\sim 7\%$) вклад многофотоэлектронных импульсов завышает оценку о.ф.э. разрешения на величину $\sim 20\%$.

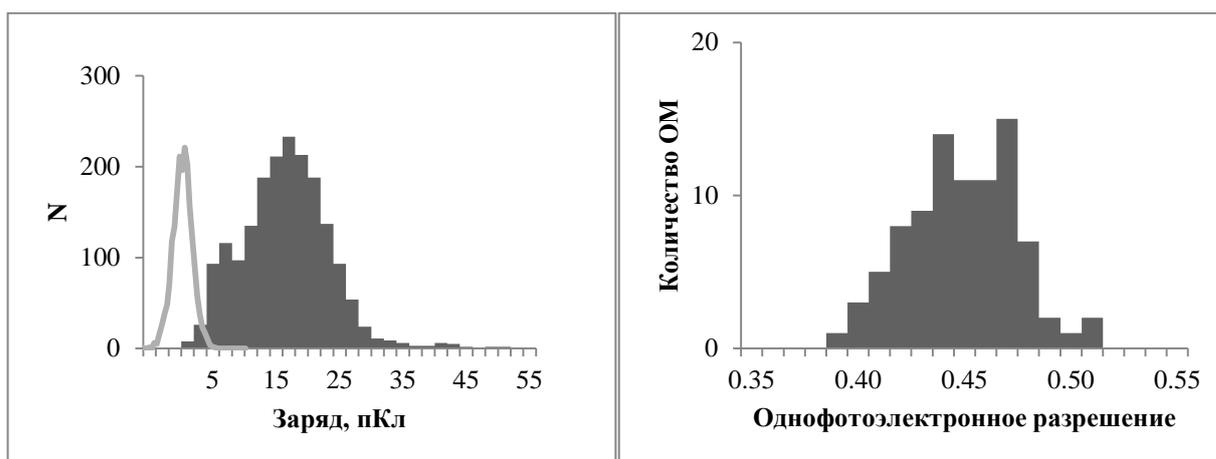


Рисунок 4-12 – характерное о.ф.э. зарядовое распределение при коэффициенте усиления ОМ $\sim 10^8$ и распределение пьедестала (слева), распределение ОМ по величине о.ф.э. разрешения (справа)

Результаты исследования зависимости задержки сигнала в оптическом модуле от величины высоковольтного напряжения были представлены в разделе «Зависимость параметров ОМ от величины высоковольтного напряжения». Задержка ОМ складывается из задержки сигнала запуска светодиода, времени пролета фотонов от светодиода до фотокатода, задержки ФЭУ и задержек усилительного тракта и кабельных коммуникаций. Основной вклад в эту величину вносит ФЭУ (60 – 80 нс), задержка которого зависит от величины высоковольтного напряжения. Разброс задержек ОМ определяется разницей во времени пролета фотоэлектронов, выбиваемых из разных точек фотокатода, через камеру ФЭУ, и характеризует временное разрешение канала.

В данном разделе приводятся результаты исследования распределение величины задержки ОМ в условиях регистрации одиночных фотоэлектронов при штатном значении высоковольтного напряжения ФЭУ (усиление канала 10^8). На рисунке 4-13 (слева) представлено типичное распределение задержек сигналов ОМ в этом режиме (время регистрации сигнала соответствует половине высоты импульса).

Для аппроксимации указанного распределения была использована функция распределения экстремальных значений:

$$y = \frac{A}{w} e^{(-e^{-z}-z)}, z = \frac{x-x_c}{w}, \quad (4-9)$$

где A – масштабный коэффициент, x_c – положение максимума распределения, w – характеристика ширины распределения, через которую выражается стандартное отклонение: $\sigma = \frac{w \cdot \pi}{\sqrt{6}}$.

Для всех ОМ, прошедших процедуру стендовых измерений, были вычислены параметры указанной функции аппроксимации. Скорректированные коэффициенты детерминации, вычисленные по результатам аппроксимации, составили величину более 0,99. Распределение значение параметра x_c (положения максимума распределения задержек) представлено в правой части рисунка 4-13. На рисунке 4-14 представлены значения x_c , вычисленные для всех ОМ, в зависимости от выбранного для них значения высоковольтного напряжения ($K_{yc} = 10^8$). Как и следовало ожидать, задержка ОМ определяется напряжением ФЭУ. Зависимость задержки ОМ от напряжения аппроксимируется прямой линией с наклоном $-0.024 \pm 0,001$ нс/В.

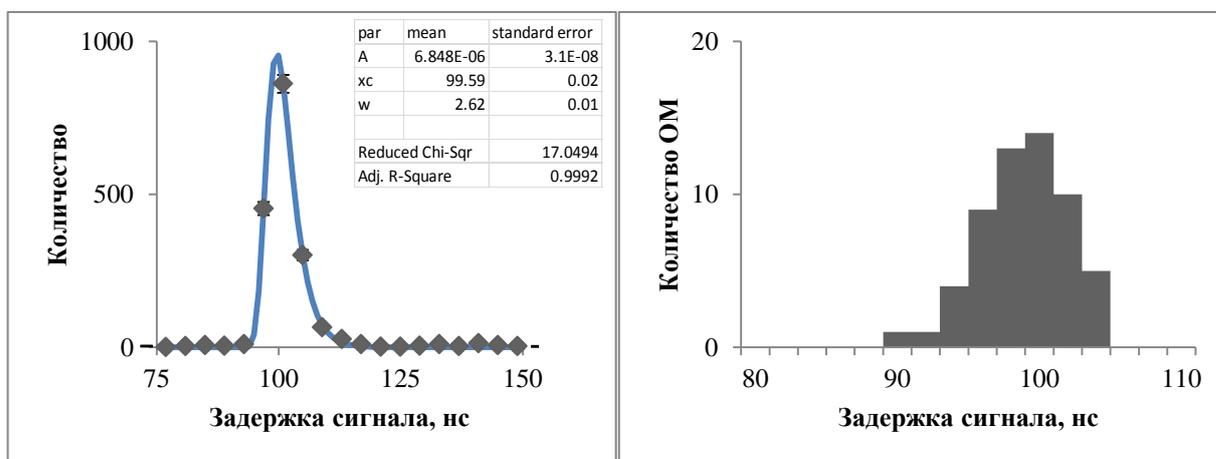


Рисунок 4-13 – распределение задержки сигнала для одного ОМ (слева) и распределение ОМ по положению максимума в распределении задержек (справа)

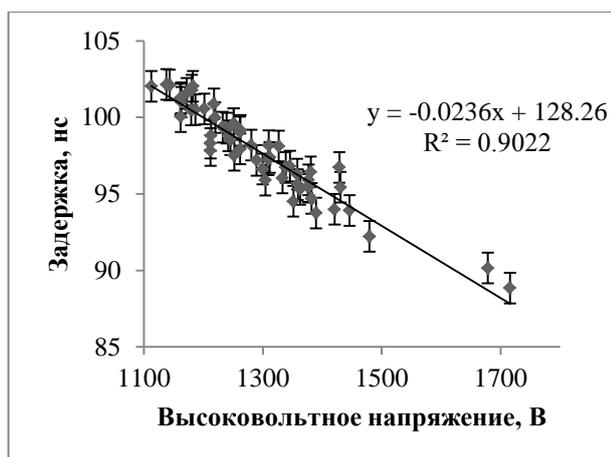


Рисунок 4-14 – задержки всех ОМ в зависимости от величины высоковольтного напряжения на делителе ФЭУ

По результатам измерения распределений задержек ОМ определялось их временное разрешение (стандартное отклонение распределения времен регистрации о.ф.э. сигналов). Распределение ОМ по величине временного разрешения представлено на рисунке 4-15 и составило в среднем величину $3,6 \pm 0,31$ нс.

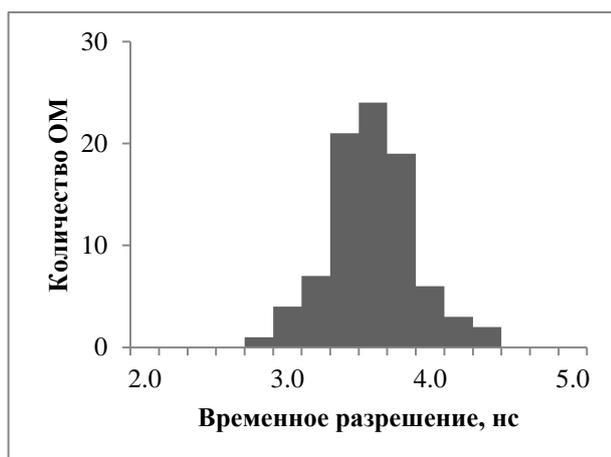


Рисунок 4-15 – распределение ОМ по величине временного разрешения

Одной из задач, решаемых при обработке физических данных с установки, является выделение о.ф.э. сигналов из шумов электроники. Для этого необходима информация о характеристиках о.ф.э. импульсов, формируемых оптическими модулями: амплитуде, ширине, длительностям переднего и заднего фронтов. Типовые распределения параметров о.ф.э. сигналов и распределения оптических модулей по средним величинам этих параметров представлены на рисунке 4-16.

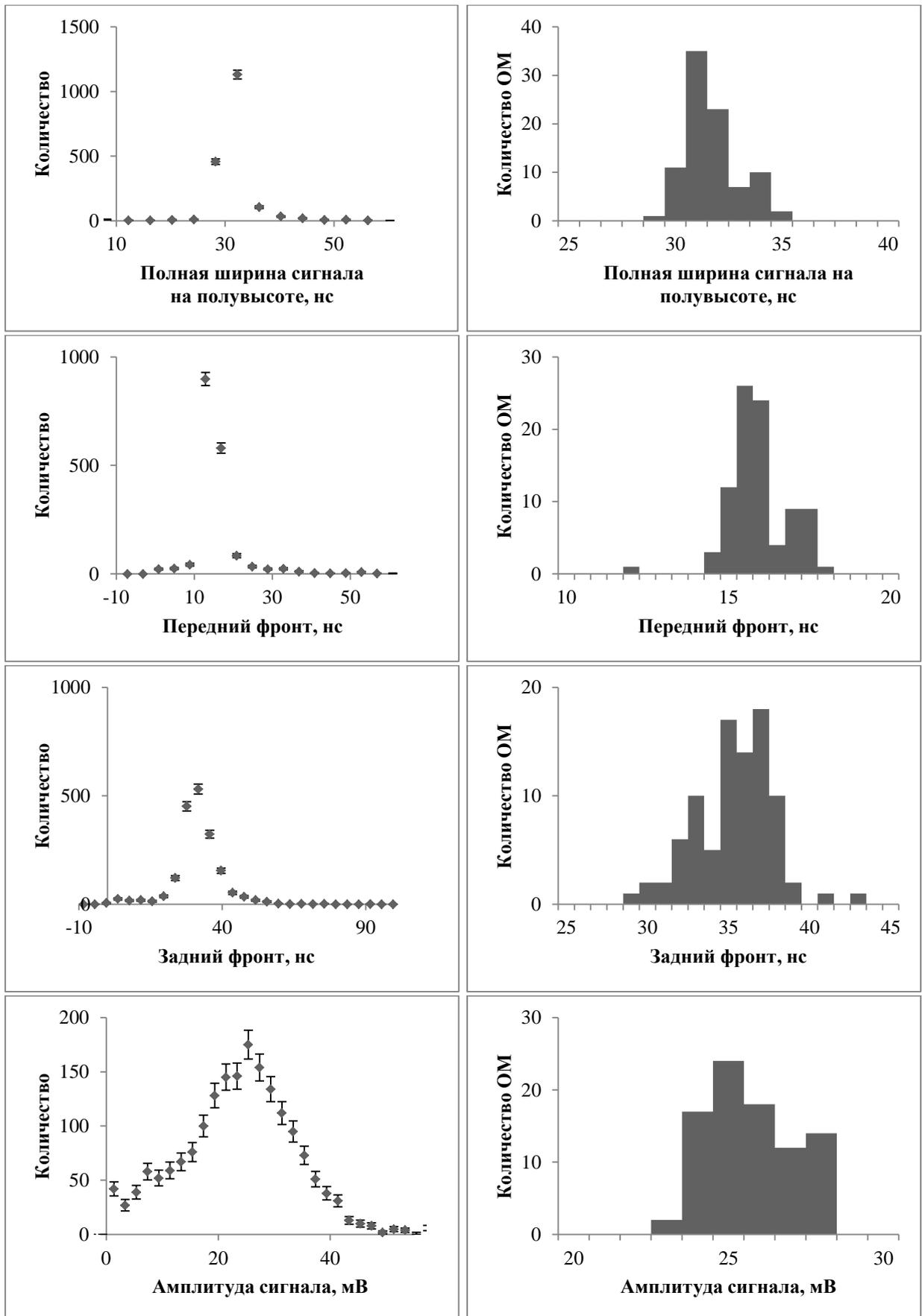


Рисунок 4-16 – параметры о.ф.э. сигналов: полная ширина на полувысоте, передний фронт, задний фронт, амплитуда: слева – типовое распределение параметра для одного из ОМ, справа – распределение ОМ по средним значениям указанных параметров

Для выборочных ОМ была измерена зависимость коэффициента усиления от величины высоковольтного напряжения по о.ф.э. спектру для контроля корректности измерения этой характеристики с использованием многофотоэлектронных (м.ф.э.) подсветок (см. рисунок 4-17). В линейной области работы ОМ наблюдается хорошее согласование результатов, полученных разными методами. В области $K_{yc} > 5 \times 10^8$ выбранный экземпляр ОМ выходит из области линейности при регистрации м.ф.э. подсветок.

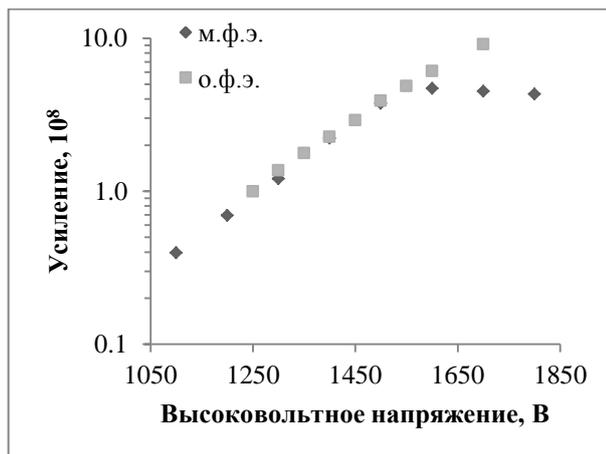


Рисунок 4-17 – зависимость коэффициента усиления ОМ от величины высоковольтного напряжения измеренная двумя методами: по о.ф.э. спектрам (квадраты) и с использованием м.ф.э. подсветок (ромбы)

Так же для выборочных ОМ проверялась зависимость о.ф.э. разрешения ОМ от величины высоковольтного напряжения (см. рисунок 4-18). В области исследованных значений напряжений о.ф.э. зависимости разрешения ОМ от напряжения на ФЭУ не наблюдалось.

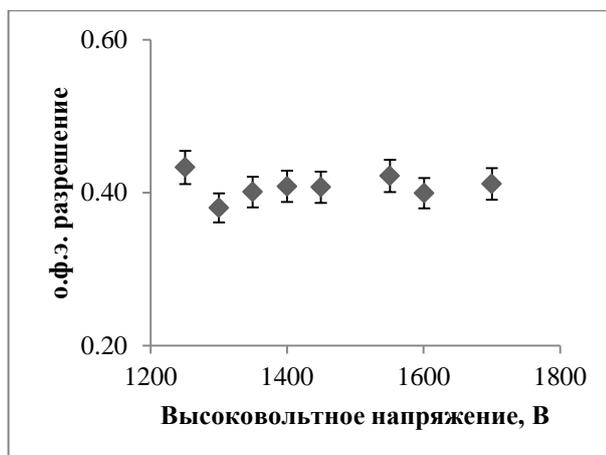


Рисунок 4-18 – величина о.ф.э. разрешения ОМ в зависимости от величины высоковольтного напряжения

Все представленные выше характеристики ОМ, измеренные в однофотозлектронном режиме работы, были получены в условиях отбора сигналов методом “фильтрации шумов” (см. начало данного раздела). Для случая, когда измерения проводятся без применения каких-либо методов отбора сигналов, типичный вид о.ф.э. распределения представлен в левой части рисунка 4-19. В этом режиме оценивается параметр ОМ, называемый отношением пик-долина (отношение максимума спектра к минимальному его значению в области сигналов меньших среднего о.ф.э. импульса). Чем больше значение этого параметра, тем точнее и надежнее оценки параметров о.ф.э. спектров. В правой части рисунка 4-19 представлено распределение ОМ по величине параметра “пик-долина”. Среднее значение этого параметра составило $1,9 \pm 0,4$. ОМ с отношением пик-долина меньшим единицы отсутствуют (для таких ОМ оценка параметров о.ф.э. распределения представляет значительные трудности).

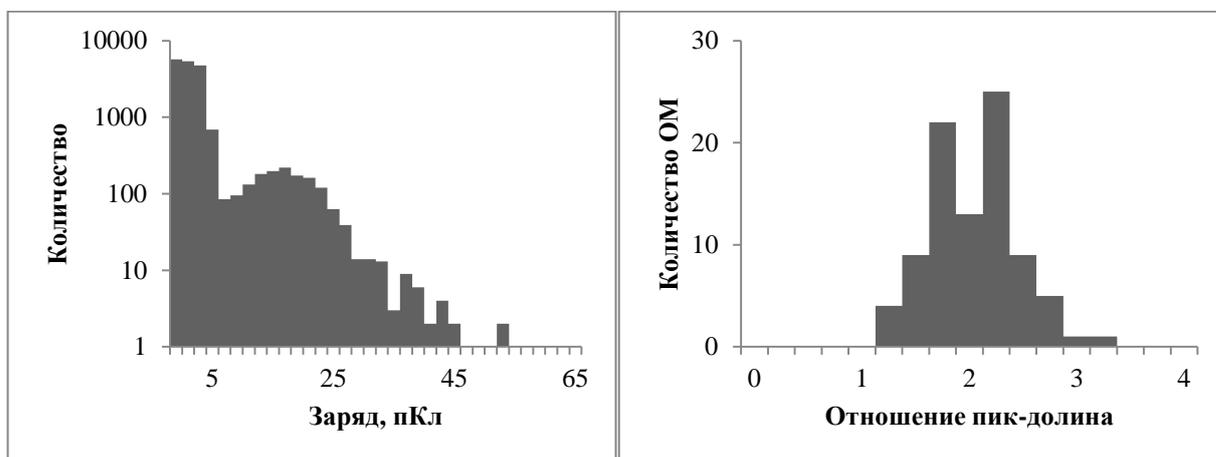


Рисунок 4-19 – распределение зарядов сигналов в режиме о.ф.э. подсветки для одного ОМ (слева) и распределение ОМ по величине отношения пик-долина (справа)

Зависимость параметров сигналов ОМ от уровня подсветки ФЭУ

В зависимости от величины светового сигнала может меняться как задержка сигнала оптического модуля, так и характер зависимости заряда сигнала от количества зарегистрированных фотонов. Для исследования этих эффектов проводились измерения параметров ОМ от величины уровня подсветки фотокатода ФЭУ.

Исследования проводились в диапазоне сигналов ОМ с зарядами от единиц до $\sim 10^3$ ф.э. (многофотозлектронный режим работы ФЭУ). Параметры сигналов каждого ОМ измерялись в точках, равномерно распределенных по логарифму заряда. Величина заряда подбиралась путем варьирования интенсивности светодиодных вспышек с точностью до единиц процентов. Измерение проводились в режиме запуска осциллографа от синхроимпульса контроллера ОМ. Время регистрации импульса фиксировалось в тот

момент, когда величина сигнала достигала половины его максимального значения. В левой части рисунка 4-20 представлена зависимость разности задержек сигналов оптического модуля, измеренных в многофотозлектронном $T_{мфэ}$ и однофотозлектронном $T_{офэ}$ режимах от величины выходного сигнала ОМ. В области линейности ОМ по амплитуде сигнала (до ~ 50 ф.э.) задержка не зависит от величины входного сигнала. В области 50 – 200 ф.э. наблюдается увеличение задержки на ~ 3 нс, при больших сигналах задержка уменьшается.

Зависимость задержки ОМ от величины выходного сигнала характеризуется параметром Δt – отклонением времени регистрации сигнала от номинального значения, соответствующего задержке ОМ, измеренной в о.ф.э. режиме работы. Распределение ОМ по граничному значению количества ф.э., для которого $\Delta t < 1$ нс, представлено в правой части рисунка 4-20.

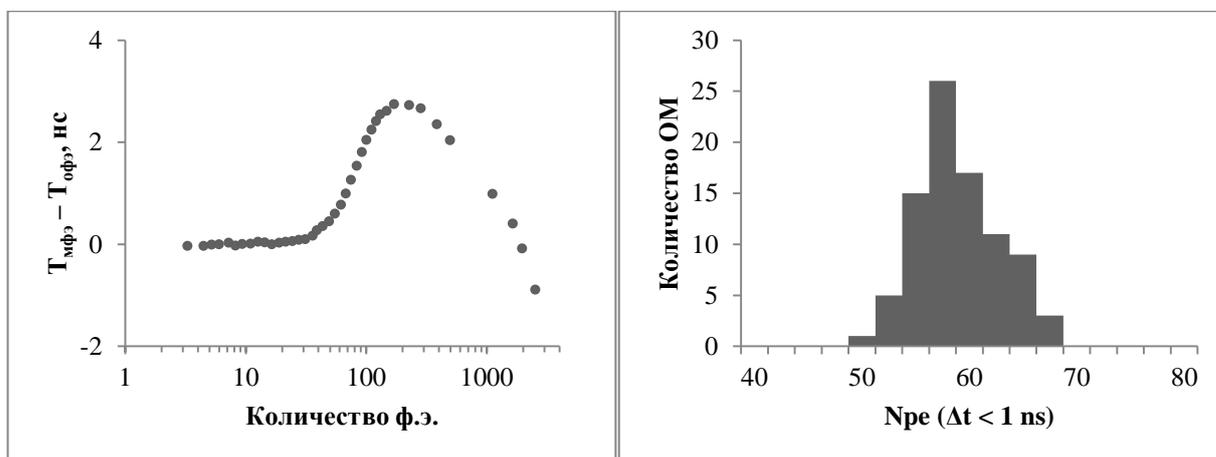


Рисунок 4-20 – разность задержек сигналов оптического модуля, измеренных в м.ф.э. и о.ф.э. режимах (слева) и распределение ОМ по граничному значению количества ф.э., для которого $\Delta t < 1$ нс (справа)

Представленная зависимость задержки от амплитуды сигнала связана с особенностями формирования переднего фронта сигнала фотозлектронным умножителем, преобразованием его усилительным трактом ОМ и методом оценки времени регистрации сигнала (измерение времени осуществляется на полувысоте импульса). На рисунке 4-21 приведены типовые формы сигналов ОМ для разных значений заряда выходного сигнала. В диапазоне до ~ 50 ф.э. амплитуда растет линейно с площадью сигнала и не наблюдается искажений формы переднего фронта. При дальнейшем росте заряда увеличивается “крутизна” основной части переднего фронта. Но в то же время пиковое значения сигнала смещается в область больших времен, что приводит к увеличению общей длительности переднего фронта и, соответственно, росту задержки канала. При сигналах больших 200 – 300 ф.э. рост амплитуды сигнала значительно

снижается, происходит “срезание” верхней части импульса и смещение пикового значения сигнала в заднюю часть импульса, в результате чего наблюдается уменьшение задержки из-за роста “крутизны” переднего фронта.

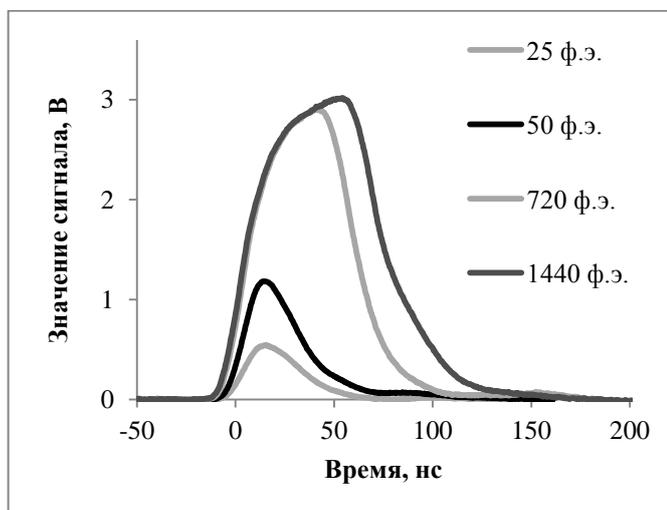


Рисунок 4-21 – типовые формы сигналов ОМ

Эффекты “насыщения” ФЭУ и ограничения амплитуды сигналов усилительным трактом не только оказывают влияние на точность измерения времени регистрации импульсов с большой амплитудой, но и ограничивают диапазон линейности каналов. Задача восстановления количества фотоэлектронов, образующих сигнал ОМ, в области нелинейности каналов является актуальной для реконструкции энергии каскадных ливней. Для решения этой задачи была разработана методика измерения функции, связывающей между собой количество фотоэлектронов и заряд выходного сигнала ОМ (так называемой “кривой насыщения”).

Измерение кривой насыщения осуществляется при помощи калибровочной системы ОМ, состоящей из двух светодиодов, путем последовательного удвоения светового потока и регистрации соответствующего отклика ОМ. Алгоритм измерения кривой насыщения представлен на рисунке 4-22.

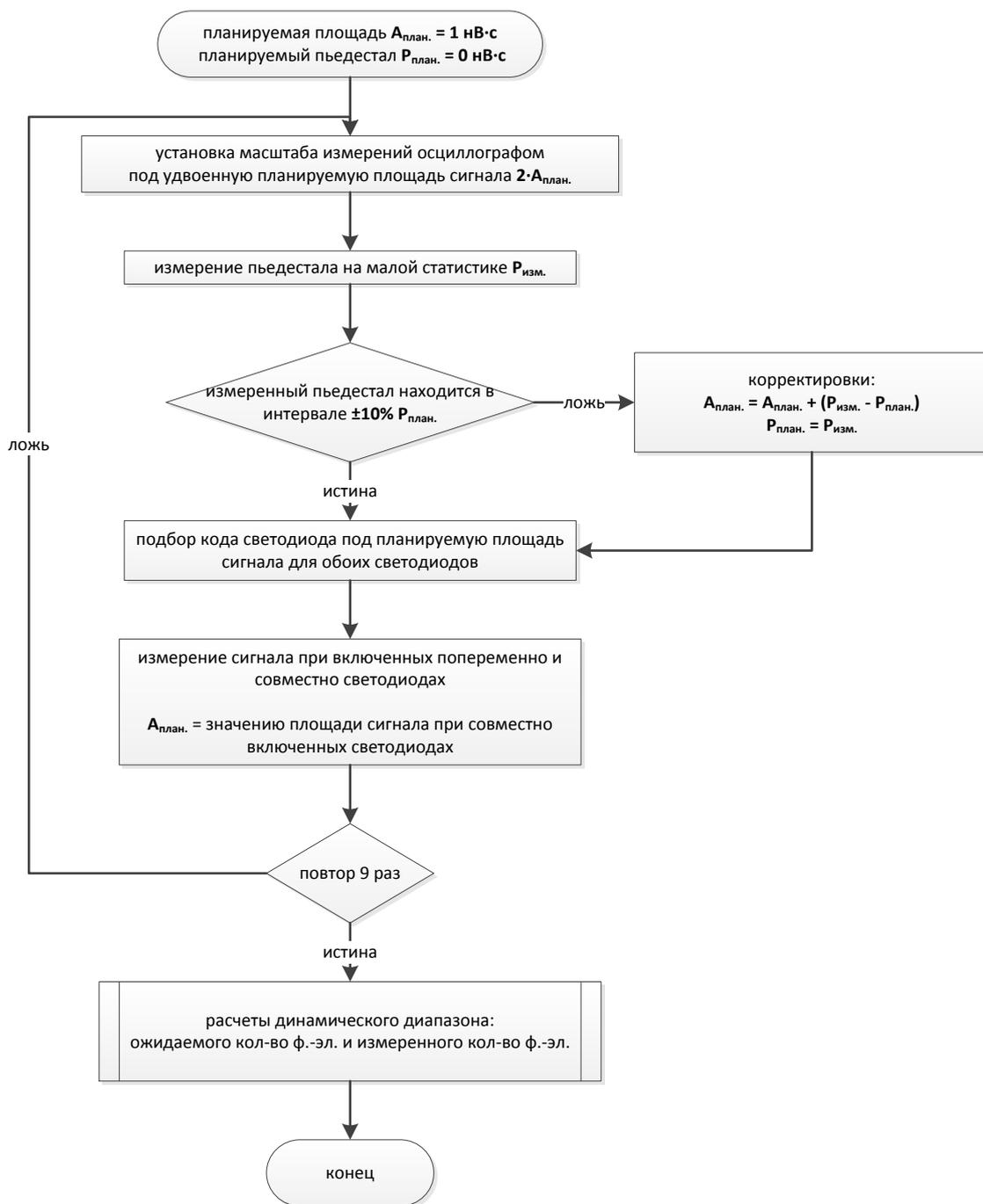


Рисунок 4-22 – алгоритм измерения кривой насыщения

Последовательное удвоение интенсивности световых вспышек позволяет экстраполировать коэффициенты преобразования каналов, измеренные в линейной области, в нелинейную область их работы. Для этого используется итерационный метод подбора интенсивности световых вспышек каждого светодиода под величину измеренного отклика канала, полученного в условиях совместного включения светодиодов. Таким образом, сложение световых сигналов от двух светодиодов при различных комбинациях яркости их вспышек позволяет формировать импульсы с заданным количеством ф.э.

На первом этапе работы алгоритма измерения кривой насыщения производился подбор кодов для обоих светодиодов, соответствующих сигналам с площадью 1 нВ·с. Затем производились измерения отклика ОМ Q на световой поток от совместно включенных светодиодов. Затем процедура повторялась, за исключением того, что коды для каждого светодиода в отдельности подбирались под величину отклика ОМ равной Q . После девяти итераций производился расчет ожидаемого и измеренного количества ф.э.

Заряд о.ф.э. сигнала $S_{офэ}$ вычислялся по следующей формуле:

$$S_{офэ} = \frac{(\sigma_{LED}^2 - \sigma_n^2)}{(1 + \delta^2) \cdot (S_{LED} - S_n)}, \quad (4-10)$$

где $S_{LED} - S_n$ – средний заряд сигналов, генерированных светодиодом, за вычетом пьедестала, $\sigma_{LED}^2 - \sigma_n^2$ – среднестатистическое отклонение этой величины, δ – относительное разрешение о.ф.э. спектра. Для увеличения точности измерений, значение $S_{офэ}$ усреднялось по всем измерениям (как с одним, так и с двумя светодиодами), в линейной области работы канала (до ~ 50 ф.э.). Измеренное количество ф.э. определяется как отношение заряда сигнала, измеренного при включенных совместно светодиодах, к средней площади о.ф.э. сигнала $S_{офэ}$. Ожидаемое количества ф.э. удваивалось для каждой итерации.

На рисунке 4-23 представлена зависимость отношения ожидаемого к измеренному количеству ф.э. от ожидаемого количество ф.э. для 87 ОМ (кривые насыщения). Вид кривых насыщения мало различается для всех проверенных ОМ.

Аппроксимация кривых насыщения производилась функцией следующего вида:

$$y = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^p}, \left(\frac{x_1}{x_0}\right)^p = \frac{p-1}{p+1} \quad (4-11)$$

где x_0 – центр ($y = 0,5$), x_1 – точка перегиба кривой, p – показатель степени. В качестве аргумента функции выступает десятичный логарифм ожидаемого количества ф.э. $x = \lg N_{pe}$.

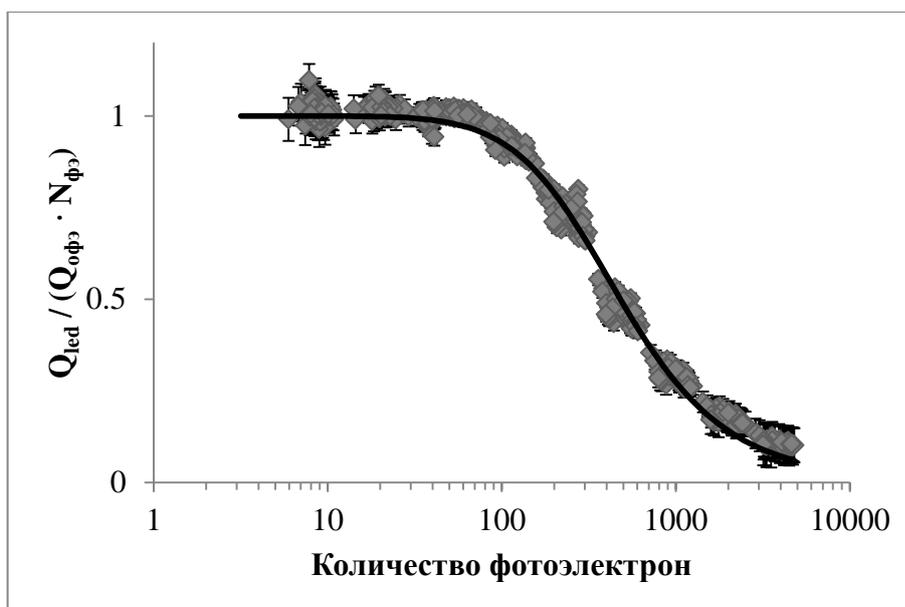


Рисунок 4-23 – кривые насыщения для 87 Ом и результат их аппроксимации

Данная функция дает хорошее значение скорректированного коэффициента детерминации: 0,987. Результаты аппроксимации представлены в таблице 4-2.

Таблица 4-2 – результаты аппроксимации кривой насыщения

Параметр	Значение
x_0	2,681 соответствует ~ 480 ф.э.
p	8,67

Точка перегиба находится в области ~ 500 ф.э., что позволяет восстанавливать исходное количество ф.э. в области до ~ 1000 ф.э. с точностью не хуже 10 %.

Послеимпульсы оптических модулей

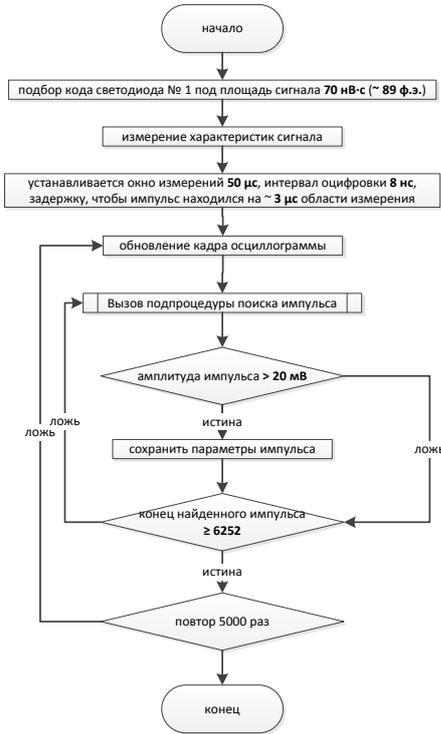
Величина вероятности возникновения на канале вторичных импульсов (послеимпульсов) после основного существенно влияет на работу системы сбора данных телескопа.

Причиной возникновения послеимпульсов является ионизация остаточного газа в камере ФЭУ ускоренными электронами. Образующиеся положительные ионы, дрейфуя в сторону фотокатода, могут выбивать из него вторичные электроны [86]. Ионы, которые достигают динодов, не влияют на работу системы сбора данных телескопа, поскольку генерируемые ими сигналы сильно теряют в усилении (умножении электронов). Так,

например, если ион достигнет второго динода, то в он уже, как минимум, теряет усиление первого динода $\sim 10 - 20$.

Амплитуда сигналов, генерированных в результате взаимодействия ионов с фотокатодом, может достигать величины в несколько о.ф.э. сигналов. В результате этого процесса в спектре шумов ФЭУ формируется высокоамплитудная составляющая. Шумовые сигналы с амплитудой в несколько фотоэлектронов являются одним из основных источников шумовых срабатываний триггерной системы телескопа. В связи с этим исследование вероятности возникновения послеимпульсов было включено в состав программы измерений характеристик оптических модулей.

Для измерения послеимпульсов устанавливается интенсивность излучения калибровочного светодиода ОМ соответствующая сигналу в ~ 90 ф.э. (опорный импульс), величина окна измерения осциллографа выбирается равной 50 мкс с периодом дискретизации 8 нс (6252 отсчета). Опорный импульс задерживается на 3 мкс от левой границы окна измерения. В процессе измерений анализируется информация с 5000 осциллограмм, содержащих как форму основного импульса, так и послеимпульсов. Из осциллограмм выделяются импульсы с амплитудой большей 20 мВ ($\sim 0,7$ о.ф.э. амплитуды). Сохраняются характеристики выделенных импульсов: площадь, амплитуда, время начала и окончания импульса на полувысоте сигнала. Блок-схема алгоритма выделения послеимпульсов и расчета их параметров представлена на рисунке 4-24. Алгоритм реализован на языках программирования C++ и VBA, что позволяет его использовать в комплексе с MS Excel (для анализа и представления данных непосредственно на осциллокопе) и в комплексе с программным обеспечением ROOT (<http://root.cern.ch>).



Подпроцедура поиска импульса

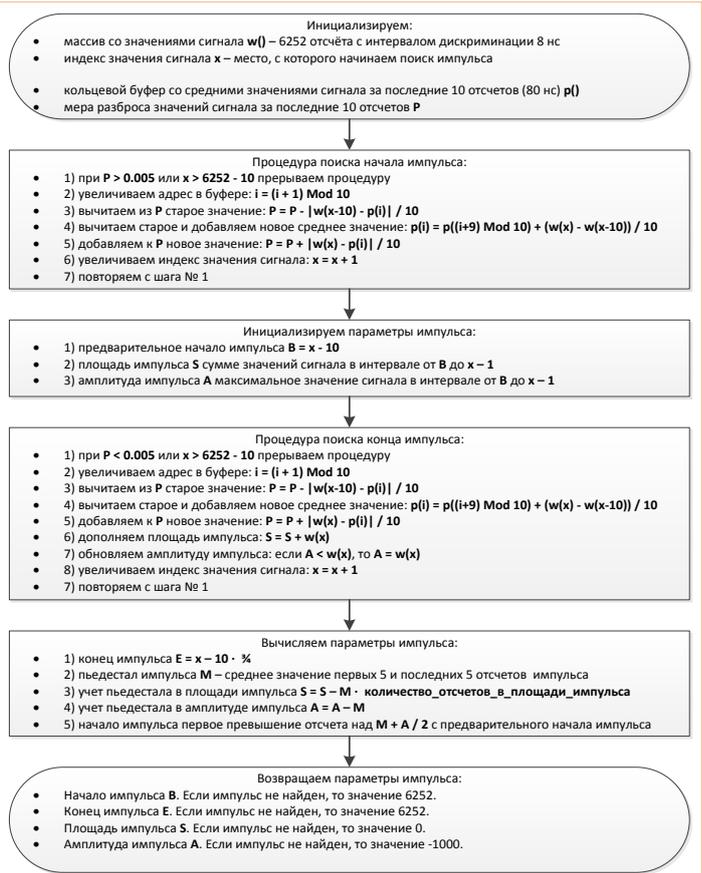


Рисунок 4-24 – алгоритм выделения послеимпульсов и расчета их параметров

На рисунке 4-25 представлен пример распределения среднего значения в интервале 100 нс вероятности возникновения послеимпульсов за 1 нс и среднего значения зарядов послеимпульсов в интервале 100 нс. Вид распределений определяется соотношением ионов разного типа, образовавшимися в колбе ФЭУ. Наибольшая вероятность возникновения послеимпульсов приходится на интервалы: 1700 – 1800 нс и 6300 – 8400 нс, наибольший заряд послеимпульсов (более 5 ф.э.) приходится на интервалы 400 – 500 нс и 800 – 2000 нс.

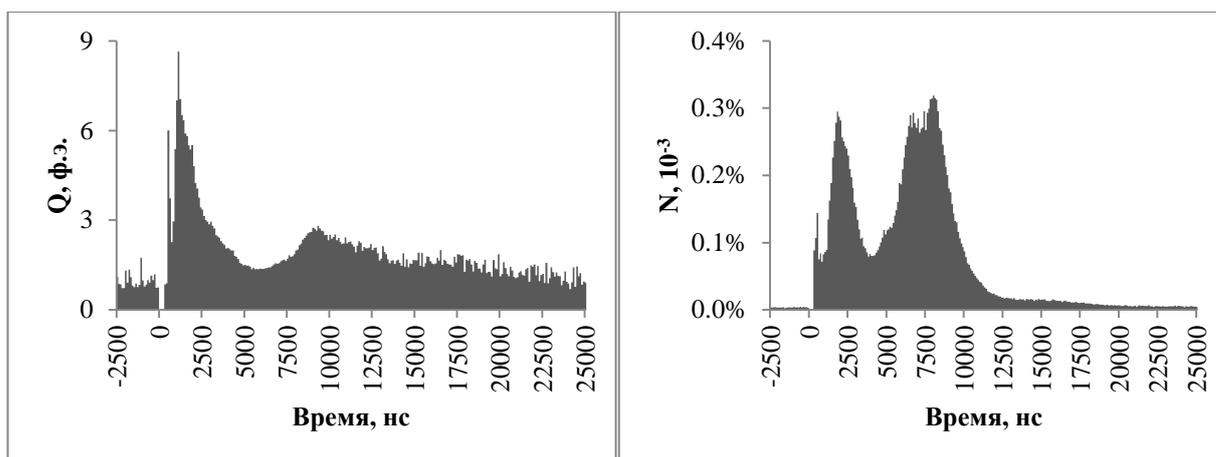


Рисунок 4-25 – пример распределения среднего заряда послеимпульса (слева) и вероятности возникновения послеимпульса в интервале 1 нс (справа)

На рисунке 4-26 представлено распределение ОМ по суммарному заряду послеимпульсов, отнесенного к заряду первичного импульса. Наблюдается значительный разброс величины заряда послеимпульсов для разных экземпляров ФЭУ.

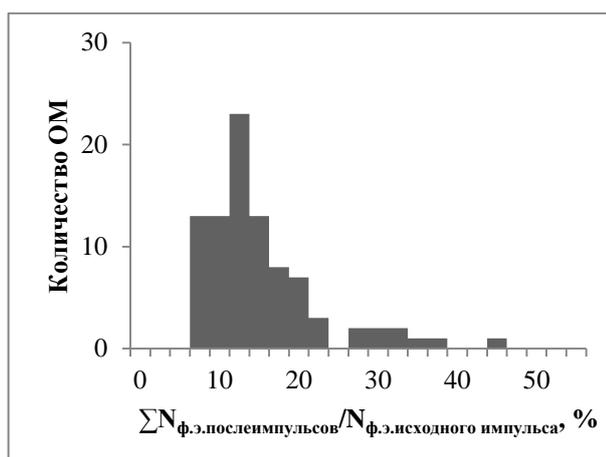


Рисунок 4-26 – доля суммарного заряда послеимпульсов по отношению к заряду первичного импульса

На рисунке 4-27 представлены временные распределения по количеству и заряду послеимпульсов для разных зарядов первичного сигнала. На верхнем рисунке показана вероятность возникновения послеимпульсов в интервале 1 нс (усреднение за 100 нс). На нижнем рисунке – средний заряд послеимпульсов, просуммированный в интервале 100 нс. Как видно из рисунков, от заряда исходного сигнала зависит только вероятность возникновения послеимпульсов.

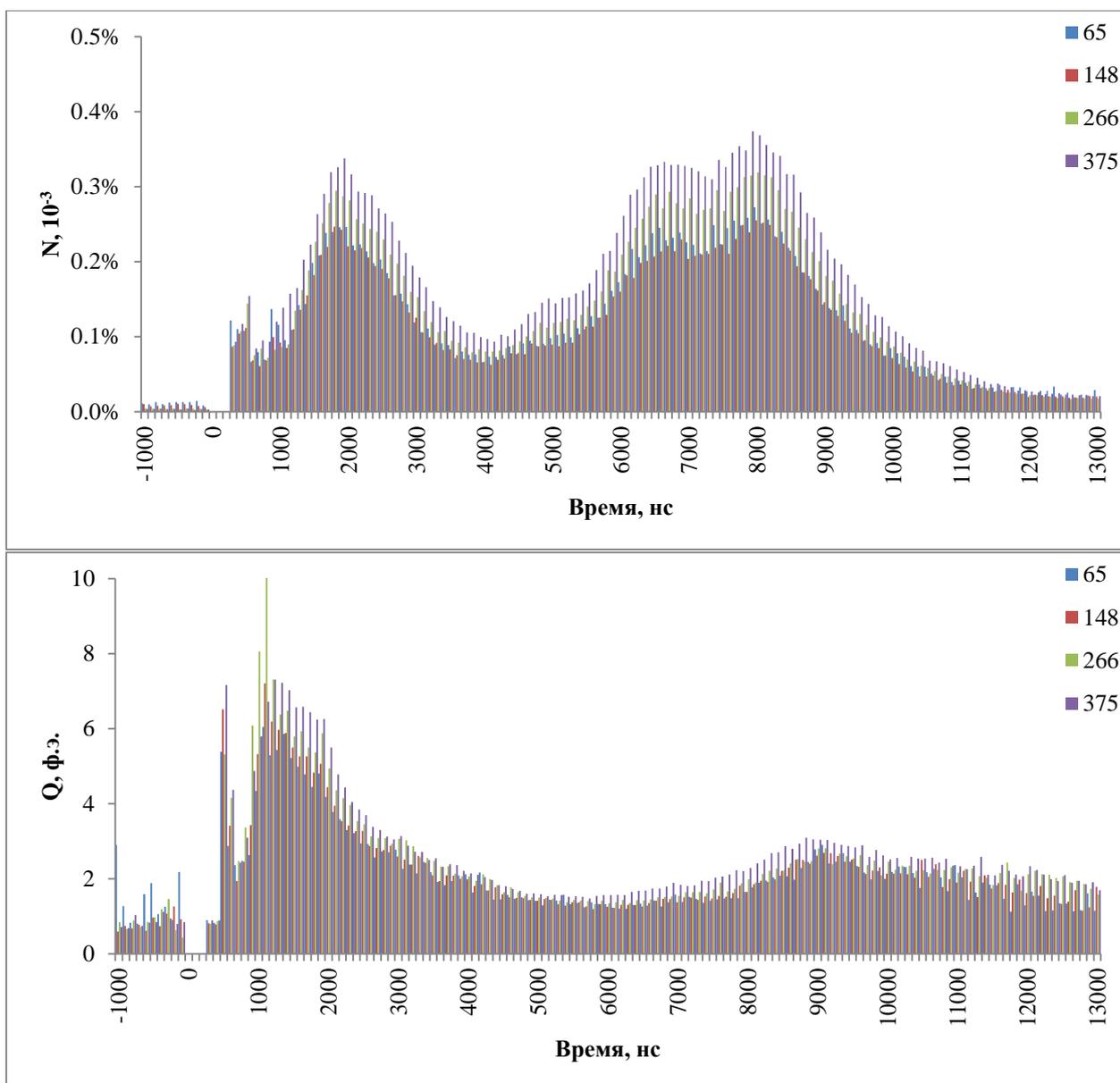


Рисунок 4-27 – распределение вероятности возникновения послеимпульсов в интервале 1 нс после первичного сигнала (сверху) и средний заряд послеимпульсов (снизу)

На рисунке 4-28 представлены количество послеимпульсов в интервале от 200 до 25000 нс и их средний заряд в зависимости от заряда исходного импульса. Количество послеимпульсов растет линейно с ростом заряда первичного сигнала. Средний заряд послеимпульсов (рисунок справа) для первых двух измерений занижен из-за вклада шумовых сигналов, которые невозможно отличить от послеимпульсов. При значительном увеличении заряда опорного сигнала происходит наложение послеимпульсов, что имитирует рост их среднего заряда. В большей мере это проявляется в области наибольшей вероятности возникновения послеимпульсов (1700 – 1800 нс и 6300 – 8400 нс).

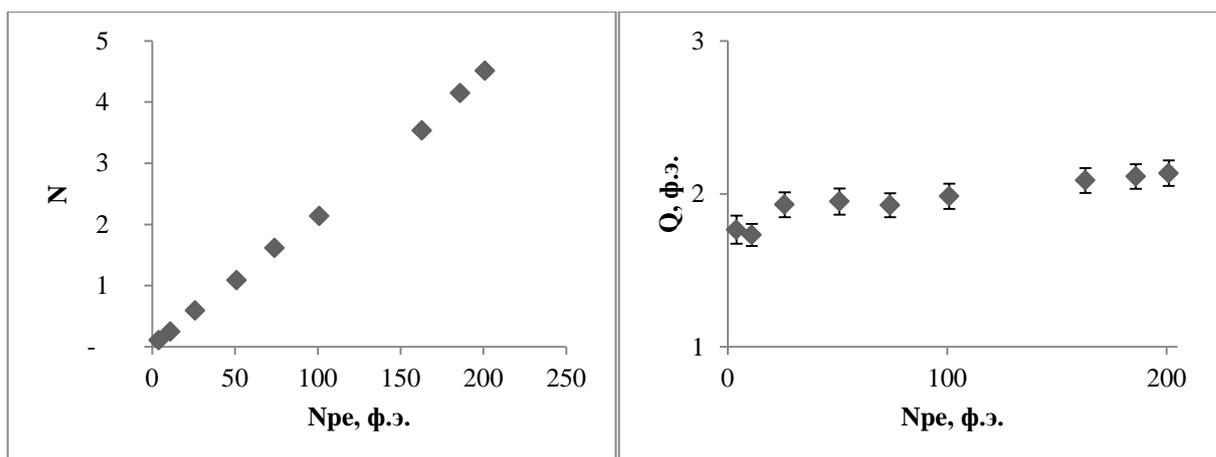


Рисунок 4-28 – количество послеимпульсов в интервале от 200 до 25000 нс (слева) и средний заряд послеимпульсов (справа) в зависимости от заряда первичного импульса

Временные распределения вероятности возникновения и заряда послеимпульсов представлены на рисунке 4-29 для трёх ОМ с разными величинами доли суммарного заряда послеимпульсов: 6 %, 10 % и 45 %. На верхнем рисунке представлено среднее количество импульсов в 750 нс интервалах отнесенное к количеству ф.э. в исходном импульсе. На втором рисунке представлен средний заряд послеимпульсов. Как видно из рисунков, вид временных распределений не зависит от доли заряда послеимпульсов. Различие заключается только в вероятности их возникновения.

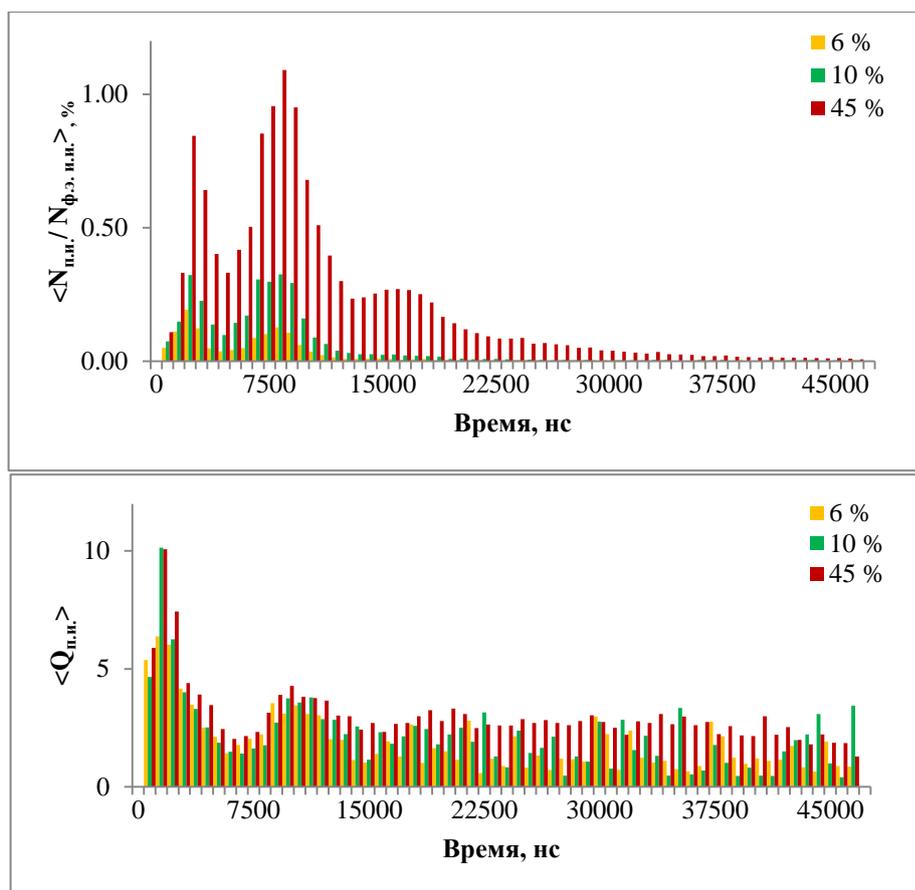


Рисунок 4-29 – количество послеимпульсов (верхний рисунок) и их заряд в ф.э. (нижний рисунок) в интервале 750 нс, отнесенные к количеству ф.э. исходного сигнала для трёх ОМ с разной долей суммарного заряда послеимпульсов

Характеристики системы калибровки и мониторинга параметров ОМ

Для временной и амплитудной калибровки ОМ используется светодиодная система и проверочный импульс, генерируемый на выходе контроллером оптического модуля. Для мониторинга уровня шумов ОМ используется встроенный в контролер ОМ счетчик импульсов с регулируемым порогом.

Основными параметрами светодиодной калибровочной системы, которые необходимо включать в паспорт каждого ОМ, являются задержки сигналов в драйверах светодиодов относительно синхросигнала. Эти параметры измерялись и записывались в банк данных ОМ. Распределения ОМ по задержке первого и второго светодиода представлены на рисунке 4-30. Средние задержки сигналов от 1-го и 2-го драйвера светодиодов составляют $2,0 \pm 0,86$ нс и $1,3 \pm 0,83$ нс соответственно. Измерения проводились при штатном значении высоковольтного напряжения для сигналов в линейной области работы ФЭУ (~ 40 ф.э.).

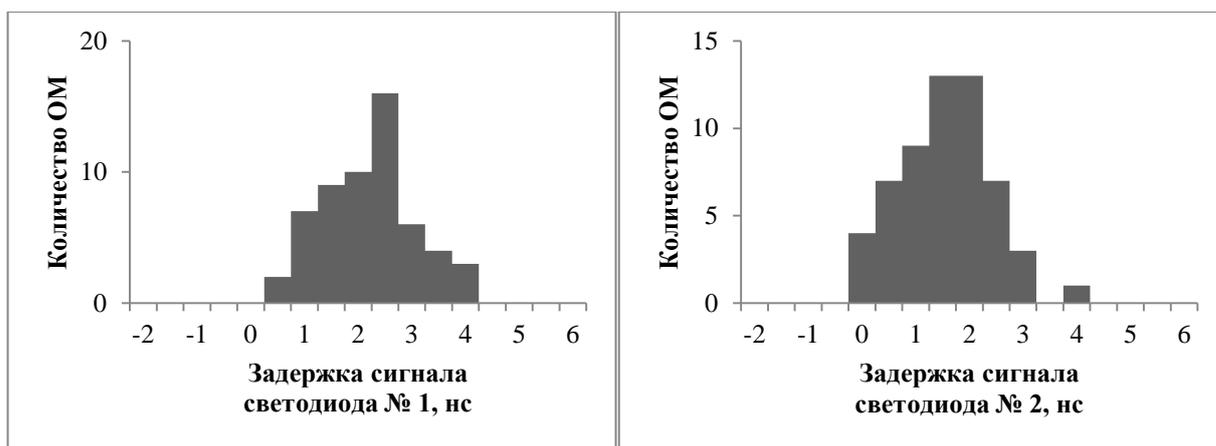


Рисунок 4-30 – распределения ОМ по задержке первого (слева) и второго (справа) светодиода

Результаты измерения параметров проверочного сигнала для партии ОМ представлены в таблице 4-3.

Таблица 4-3 – средние значения и разброс параметров проверочного импульса для 87 ОМ

Амплитуда	377 ± 15 мВ
Задержка	$23 \pm 1,1$ нс
Полная ширина на полувысоте	$92,6 \pm 0,15$ нс
Передний фронт	$47,3 \pm 0,74$ нс
Задний фронт	$56 \pm 1,0$ нс

На рисунках 4-31, 4-32 и 4-33 представлены распределения ОМ по амплитуде проверочного импульса, его длительности, параметрам переднего и заднего фронта и задержке относительно синхросигнала.

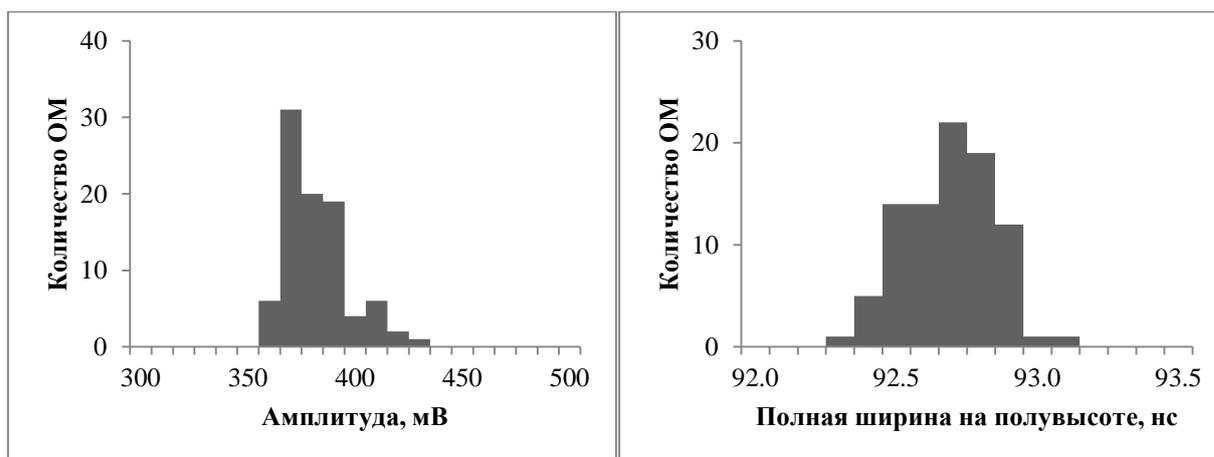


Рисунок 4-31 – распределение ОМ по амплитуде и ширине на полувысоте проверочного импульса

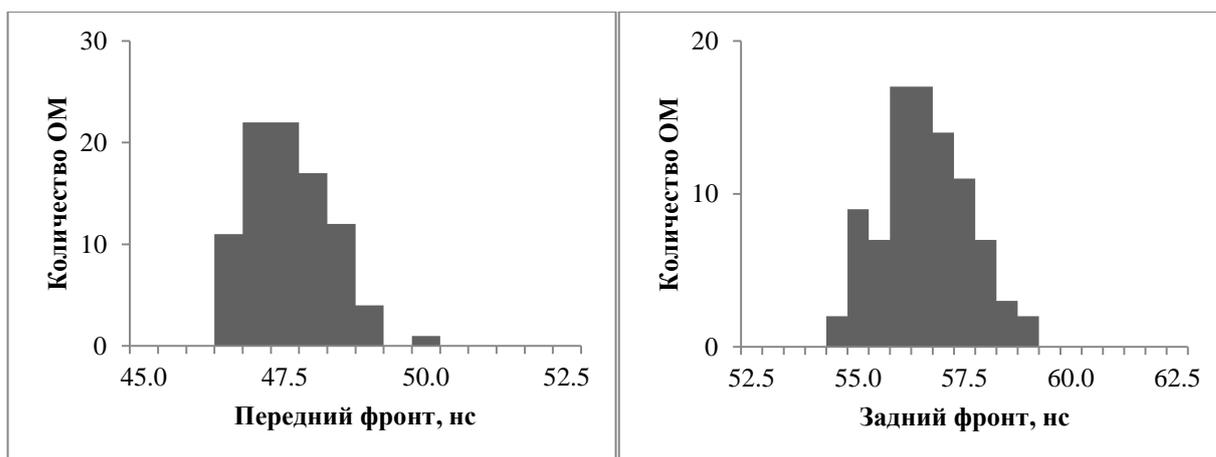


Рисунок 4-32 – распределение ОМ по величине переднего и заднего фронта проверочного импульса

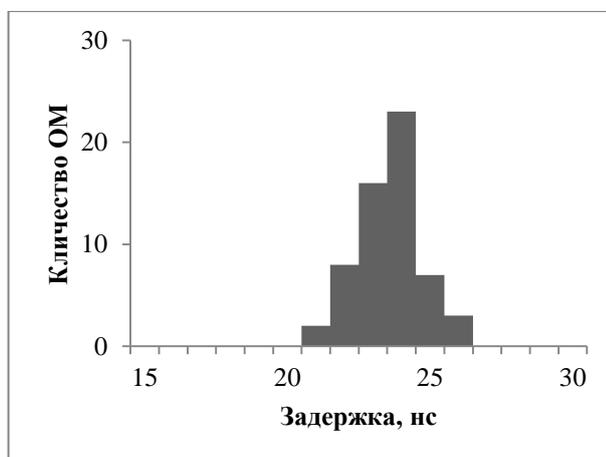


Рисунок 4-33 – распределение ОМ по задержке проверочного импульса

Для контроля работы счетчика, контролирующего уровень шумов ОМ, измерялась зависимость скорости счета шумов от величины порога регистрации счетчика при штатном значении высоковольтного напряжения. Скорость счета измерялась после выдерживания ФЭУ при включенном высоковольтном напряжении на протяжении двух и более часов. Измерения проводились с включенным высоковольтным напряжением в интервале порогов счетчика от 5 по 50 с шагом 5 мВ; от 60 по 250 с шагом 20 мВ; от 350 по 950 с шагом 100 мВ – и с выключенным высоковольтным напряжением: от 5 до 40 с шагом 5 мВ.

Типовая зависимость скорости счета шумов одного ОМ с выключенным и включенным высоковольтным напряжением (слева) и распределение ОМ по уровню скорости счета (справа) представлены на рисунке 4-34. Следует выделить два источника шумов ОМ: шумы электроники и шумы ФЭУ. Шумы электроники (пик в левой части рисунка 4-34) обрезаются порогом счетчика на уровне 10 – 15 мВ (~ 0,3 ф.э. на выходе

мониторного канала). Счетчик контроллера ОМ корректно считает импульсы при скорости счета до 80 кГц, при больших значениях наблюдаются просчеты. Средняя скорость счета может значительно отличаться для разных оптических модулей. Однако, учитывая малое время выдержки ОМ в темноте (по данным мониторинга шумов каналов телескопа темновая скорость счета ОМ понижается в течение нескольких недель), данное распределение носит скорее иллюстративный характер, демонстрируя только корректную работу мониторного счетчика шумов.

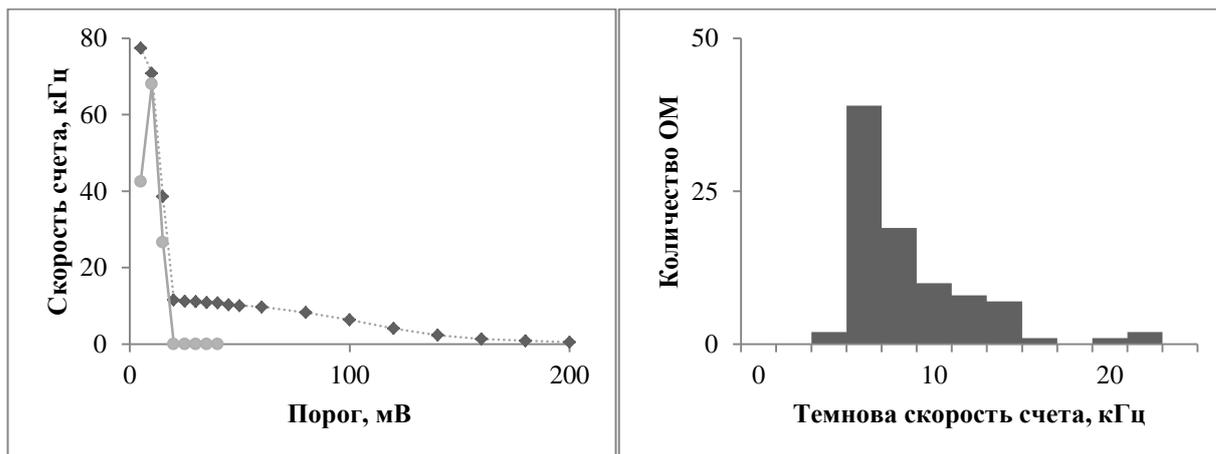


Рисунок 4-34 – типовая скорость счета шумов для одного из ОМ в зависимости от порога регистрации: кружки – с выключенным высоковольтным напряжением и ромбы – с включенным высоковольтным напряжением (слева) и распределение ОМ по средней скорости счета шумов при пороге 30 мВ (справа)

Выборочная проверка ФЭУ

Выборочная проверка ФЭУ осуществлялась при использовании электроники, аналогичной электронике ОМ, за исключением того, что сигнал с ФЭУ передавался без усиления непосредственно на вход осциллографа при помощи коаксиального кабеля длиной 2 м. Для исключения влияния электромагнитных наводок на результаты измерений фотоэлектронный умножитель помещался в алюминиевый контейнер, соединенный с общим контактам осциллографа.

Автоматизированный алгоритм проверки ФЭУ включал следующие процедуры:

1. Установка опорного высоковольтного напряжения.
2. Выдерживание ФЭУ в темноте с включенным напряжением в течение 8 часов.
3. Подбор кода светодиода для подсветки ФЭУ в области линейности канала (250 мВ, ~ 100 ф.э.).

4. Измерение параметров сигнала (амплитуды, площади, длительности фронта, ширины на полувысоте, задержки) в зависимости от величины высоковольтного напряжения.
5. По линейной аппроксимации логарифмической зависимости вычисленных коэффициентов усиления ФЭУ от высоковольтного напряжения вычисляется напряжение ФЭУ, соответствующее коэффициенту усиления 10^7 .
6. При выбранном значении высоковольтного напряжении производиться измерения всех основных параметров сигналов в зависимости от величины засветки ФЭУ.

Измерения были проведены для разных партий поставляемых ФЭУ. В общей сложности были измерены параметры 32 фотоэлектронных умножителей. Зависимости коэффициентов усиления, ширины и задержки сигналов ФЭУ от величины высоковольтного напряжения представлены на рисунках: 4-35 и 4-36. На рисунке 4-37 показана зависимость ширины импульса от заряда выходного сигнала. Измерение всех временных параметров производилось на уровне половины амплитуды выходного сигнала.

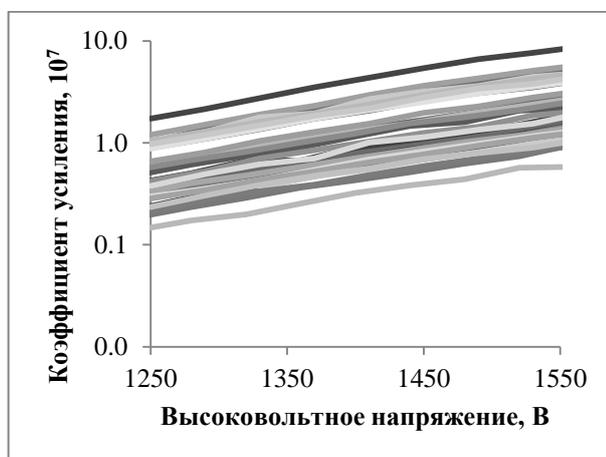


Рисунок 4-35 – зависимость коэффициентов усиления 32 ФЭУ от величины высоковольтного напряжения.

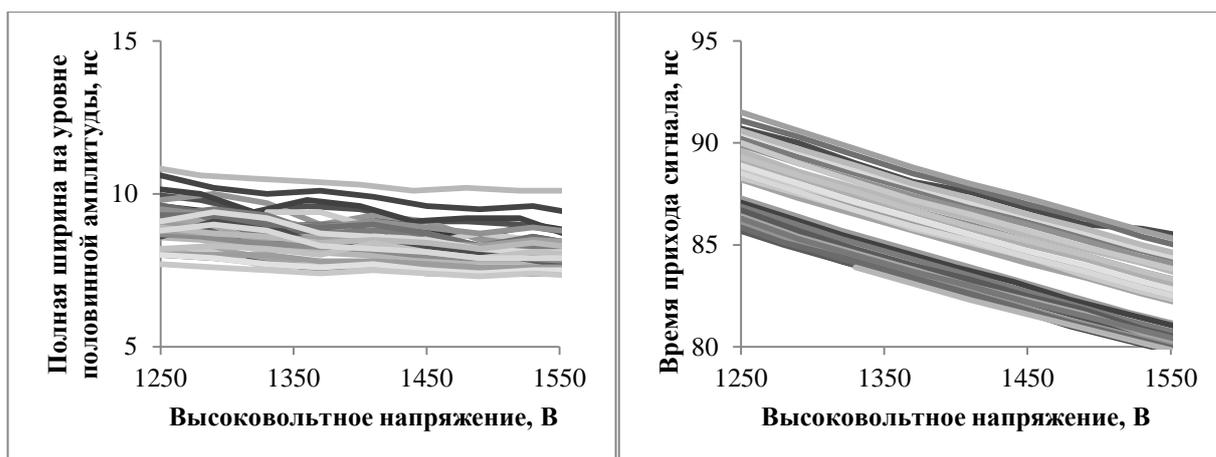


Рисунок 4-36 – зависимости полной ширины сигнала (слева) и времени прихода сигнала без вычета задержек в стенде (справа) от высоковольтного напряжения

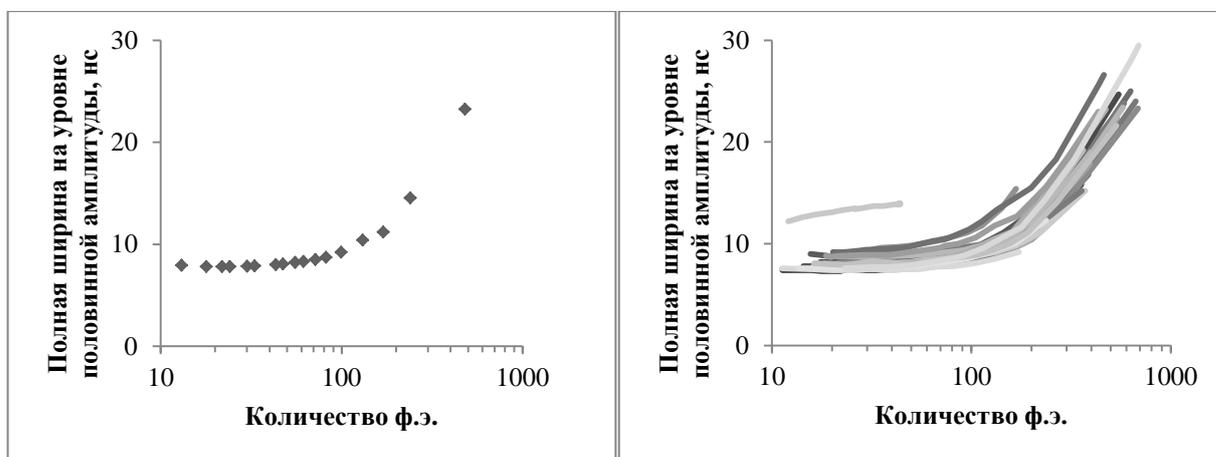


Рисунок 4-37 – типовая зависимость полной ширины импульса на полувысоте для одного ФЭУ (слева) и для 32 ФЭУ (справа) от заряда выходного сигнала

Проверенные ФЭУ существенно различаются по величине высоковольтного напряжения, обеспечивающего усиление 10^7 , ширине сигнала (FWHM) и значению его задержки. Один из ФЭУ был отбракован из-за низкой величины высоковольтным напряжением (верхняя кривая на рисунке 4-35), и аномально большой ширины сигнала (верхняя кривая на рисунке 4-37 справа).

§ 3. Основные результаты массовой проверки ОМ

В результате проведения массовой проверки оптических модулей были измерены и проанализированы основные временные и амплитудные параметры ОМ, подобрано значение высоковольтного напряжения, обеспечивающего одинаковую величину коэффициента усиления каналов (10^8), проверена корректность функционирования электроники ОМ во всех режимах работы: регистрации физических сигналов, калибровки

со светодиодным источником, мониторинга параметров ОМ. Было получено, что после выравнивания усиления каналов, их основные временные и амплитудные характеристики достаточно близки. В таблице 4-4 представлены результаты измерений основных характеристик оптических модулей.

Таблица 4-4 – 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 $y(N_{ф.э.}) = Q_{мфэ} / (Q_{офэ} \cdot N_{ф.э.})$	$y = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^p},$ $x = \lg N_{ф.э.},$ $\left(\frac{x_1}{x_0}\right)^p = \frac{p-1}{p+1},$ $x_0 = 2,681$ $p = 8,67.$
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 ± 15 мВ
Ширина	$92,6 \pm 0,15$ нс
Передний фронт	$47,3 \pm 0,74$ нс
Задний фронт	$56 \pm 1,0$ нс

Все измеренные характеристики сохранены в банке данных ОМ. На основании этих характеристик формируются паспорта индивидуальных оптических модулей. На рисунке 4-38 представлен пример паспорта оптического модуля.

Параметр	Значение	Параметр	Значение
controller	38	Delay LED1 (HV) a (ax+b)	-2.6E-11
Number of PMT	1105	Delay LED1 (HV) b (ax+b)	5.7E-07
channel	2	min code LED1	377
Date & time	18.02.16 10:14	max code LED1	536
operator	Алексей Шейфлер	min code LED2	380
HV (MPE)	1234.316	max code LED2	539
HV (SPE)	1232.32	stand delay	-535.264
LED1 1pe	386	noise (kHz)	4.010333
Qpe	-0.79428	LED1 for afterpulses (code)	456
Ape	0.024299	LED1 for afterpulses (area)	-199.148
delta	0.409695	LED1 for afterpulses (amplitude)	2.482226
Gain (HV)	1E+08	HV min	1127.18
Gain (SPE)	99884792	HV max	1297.18
Peak / valley	5.254477	Statistic	800
level ap	67.21625	Date & time (finished)	2016.02.18 11:34

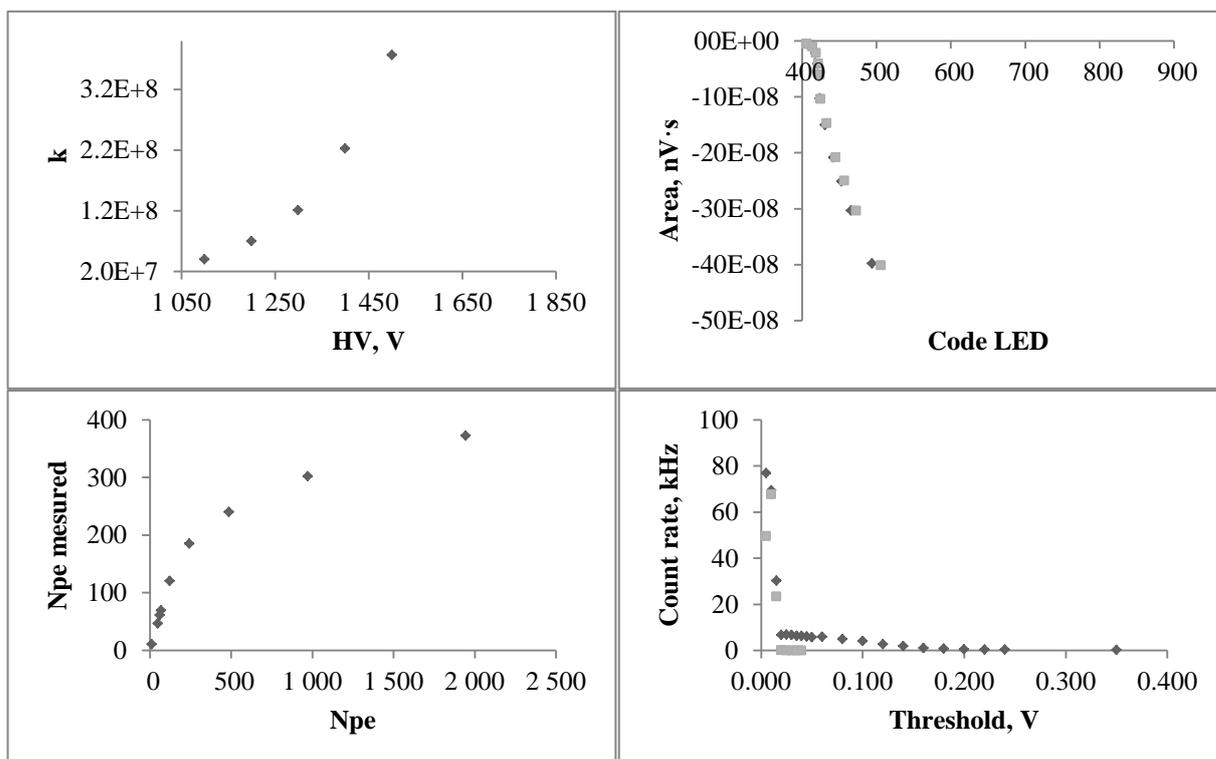


Рисунок 4-38 – пример паспорта оптического модуля

Глава 5. Обеспечение надежности работы

Оптические модули предназначены для непрерывной работы в составе нейтринного телескопа Baikal-GVD в течение не менее 10 лет. Выход из строя измерительных каналов за этот период не должен существенно снижать эффективность работы установки. Как отмечалось выше, отличительной особенностью Baikal-GVD является возможность ремонта вышедших из строя каналов. Однако, в связи с небольшой продолжительностью периода, в который установка доступна для профилактических работ, ремонт возможен только ограниченного числа ОМ. Планируемый телескоп Baikal-GVD будет состоять из ~ 2500 оптических модулей сгруппированных в ~ 100 гирлянд. Учитывая, что для ремонта одного ОМ необходим демонтаж в среднем 50 % оптических модулей на гирлянде, в течение года может быть восстановлено не более 12 – 14 оптических модулей, т. е. ~ 0,5 % от их общего числа. Таким образом, при требовании, что бы за 10 лет эксплуатации эффективность установки снизилась не более чем на 5 %, вероятность выхода из строя ОМ в течение года не должна превышать величину 1 %.

Надежность работы ОМ определяется следующими факторами:

- количеством и 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.

При конструировании оптического модуля одними из основных требований были минимизация составляющих его элементов и максимальная простота сборки модуля. Для связи элементов ОМ между собой используется один ленточный кабель (плата ФЭУ – контроллер), два коаксиальных кабеля (для вывода сигнала ФЭУ из ОМ и для подключения мониторингового счетчика шумов ФЭУ), два провода (для электропитания и передачи данных) и клеммные соединители для подключения источника высоковольтного напряжения ФЭУ.

Схема, описывающая основные этапы сборки и подготовки оптических модулей и методику испытаний аппаратуры на этих этапах, представлена на рисунке 5-1.

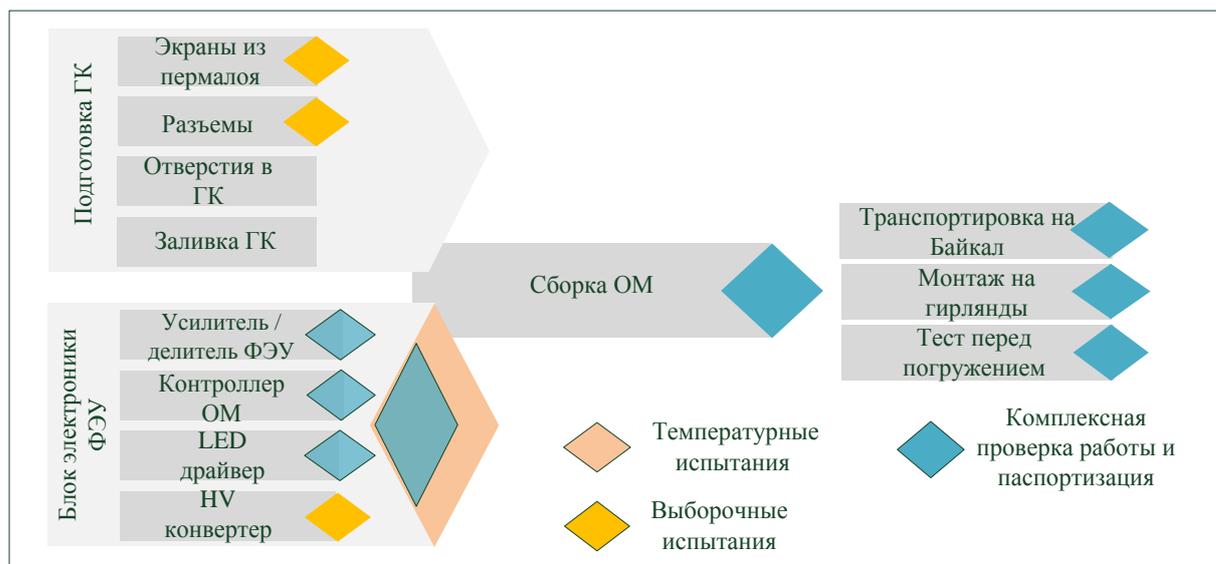


Рисунок 5-1 – схема поэтапной подготовки и испытаний ОМ

На первом этапе подготовки ОМ собираются глубоководный корпус (ГК) модуля и блок электроники ФЭУ. Сборка ГК включает в себя сверление отверстий в корпусе, установку разъемов и заливку ФЭУ вместе с экраном из пермаллоя двух-компонентным гелем. После сверления сфера тщательно очищается, внутренняя поверхность нижней полусферы и стеклянная поверхность ФЭУ в области фотокатода обезжириваются. Нижняя полусфера устанавливается в специальный монтажный стапель (см. рисунок 5-2). Затем устанавливается внутрь стеклосферы полусферическая часть магнитного экрана. ФЭУ закрепляется в держателе и центрируется на расстоянии между полюсом ФЭУ и внутренней поверхностью стеклосферы ~ 4 – 5 мм.



Рисунок 5-2 – монтажный стапель для вклейки ФЭУ и магнитного экрана на силиконовый гель

После фиксации ФЭУ на стапеле пространство между ФЭУ и стеклосферой заполняется гелем до уровня, превышающего границу фотокатода на 5 – 6 мм. После заливки геля собранная система вместе со стапелем помещается в вакуумную камеру и выдерживается под вакуумом (остаточное давление 0,2 – 0,1 атм.) в течение 1,5 часов для удаления пузырей воздуха, попавших в гель в процессе заливки. Затем вакуум в камере понижается до остаточного давления 0,4 атм. Собранная система остается в вакуумной камере еще на 6 часов до полной полимеризации геля. После окончания процесса полимеризации геля в полусфере вклеиваются металлические кронштейны, служащие для фиксации блоков электроники и устанавливается ответная часть магнитного экрана. Вторая полусфера оснащается вакуумным портом, манометром, глубоководным разъемом и коммутационной платой.

При подготовке блока электроники ФЭУ осуществляется комплексная проверка и паспортизация всех его электронных узлов. Исключения составляют источники высоковольтного напряжения ФЭУ, которые поставляются фирмой TRACO POWER Японии (предусмотрено только выборочная проверка ~ 5 % из каждой партии). На этом этапе проверки и паспортизации осуществляется производителями оборудования в соответствии с разработанным техническим заданием. Пример результатов измерения параметров блока усилителей ОМ представлен на рисунке 5-3. На осциллограмме показаны входной и выходные сигналы, а так же результаты измерений их параметров при помощи встроенных функций осциллографа. Аналогичные осциллограммы измеряются и записываются для всех блоков усилителей. Результаты измерений заносятся в таблицу EXCEL для последующего формирования базы данных параметров ОМ.

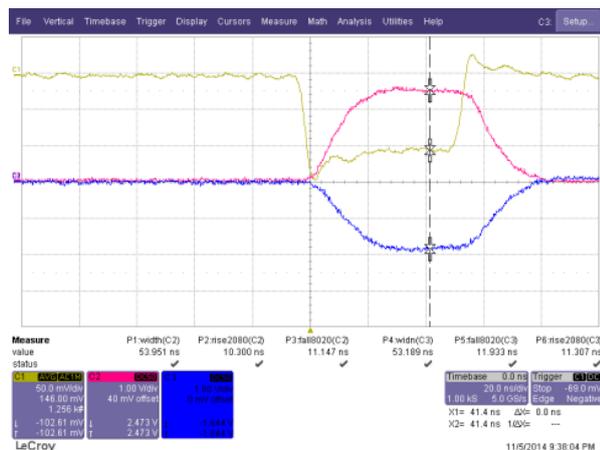


Рисунок 5-3 – пример результатов измерения параметров блока усилителей ОМ

При тестировании делителя напряжений ФЭУ на него подается напряжение 1500 В и измеряются напряжения на камере ФЭУ и всех диодах. Пример результатов измерения параметров делителя представлен в таблице 5-1.

Таблица 5-1 – результаты измерения напряжений 3-х делителей ФЭУ (Вольты)

Комплект	Dy1*10	F3*10	Dy3*10	Dy5*10	Dy7*10	Dy9*10	P*10	Dy10*10	Dy8*10
11	535	562	961	1206	1302	1398	1497	1448	1350
12	534	562	959	1202	1298	1393	1491	1443	1345
13	533	560	957	1200	1296	1391	1489	1441	1344
Комплект	Dy6*10	Dy4*10	Dy2*10	F1*10	F2*10	K*10	Dy1-K	F2-Dy1	F1-F2
11	1254	1121	720	562	535	0	535	0	27
12	1249	1117	717	562	534	0	534	0	28
13	1248	1116	717	560	533	0	533	0	27

Испытания собранного блока электроники ОМ (блок усилителей, делитель ФЭУ, контроллер, источник высоковольтного питания, драйверы светодиодов) включают в себя полное тестирование его работоспособности, калибровку основных параметров (задержек сигналов, кодов ЦАП контроллера ОМ для источника высоковольтного напряжения и светодиодов, порога счетчика шумов ФЭУ) и температурные испытания. Пример результатов проверки блока электроники ОМ представлен в таблице 5-2. Стоит обратить внимание на два характерных значения задержки сигналов между проверочным импульсом и первым светодиодом: ~ 2 нс и ~ 12 нс. Данный разброс вызван изменением элементной базой контроллеров ОМ. В дальнейшем данная особенность учитывалась в калибровке контроллера ОМ (введен дополнительный параметр прошивки контроллера ОМ, где хранится данное значение задержки).

Таблица 5-2 – результаты проверки блоков электроники ОМ

№ блока электроники ОМ	Коэффициент усиления выходов усилителя				Проверочный импульс		Задержка между светодиодами и проверочным импульсом		
	Основной		Мониторный						
	A	Q	A	Q	A, мВ	τ , нс	$\Delta 10\%$, нс T_{test}, T_{LED1}	Δ , нс T_{test}, T_{LED2} $\delta = 0,0$ нс	Δ , нс T_{test}, T_{LED2} $\delta = 180,8$ нс
01	14,4	16,2	20,6	22,8	600	89,8	2,3	0,2	181,1
02	14,5	16,9	21,4	23,4	585	90,0	2,3	0,1	180,9
03	14,6	17,0	21,5	23,6	590	90,0	3,5	-0,6	180,0
...									
07	14,9	16,7	21,5	23,6	600	89,7	12,8	0,1	181,1

№ блока электроники ОМ	Коэффициент усиления выходов усилителя				Проверочный импульс		Задержка между светодиодами и проверочным импульсом		
	Основной		Мониторный		А, мВ	τ, нс	Δ10%, нс T _{test} , T _{LED1}	Δ, нс T _{test} , T _{LED2} δ = 0,0 нс	Δ, нс T _{test} , T _{LED2} δ = 180,8 нс
	А	Q	А	Q					
08	14,4	16,8	21,0	23,5	606	89,6	3,4	-0,2	180,7
...									
48	14,4	16,7	20,6	23,2	591	90,0	14,0	-0,1	180,8
49	14,0	16,5	20,5	23,4	586	90,0	11,7	0,2	180,9
50	14,0	16,7	20,8	23,5	590	89,8	11,1	-0,1	180,8

Важную роль в обеспечении надежности электронной аппаратуры играют температурные испытания. На рисунке 5-4 показана типовая зависимость частоты отказов электронного оборудования от времени. Выделяются три области: период ранних отказов, период стабильной работы и период износа. Долговременное температурное испытание электроники предназначено для выявления дефектов электронных компонентов, которые с наибольшей вероятностью проявляются в первые 2 – 3 недели работы. Ускорение старения электронных компонент под действием температуры позволяет быстро пройти период приработки в лаборатории, выявляя ранние отказы.

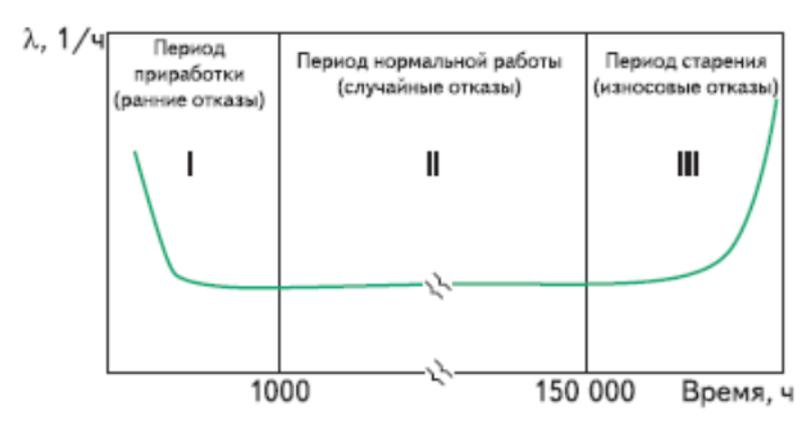


Рисунок 5-4 – характерный вид зависимости частоты отказов от времени

При повышении температуры от T_1 до T_2 старение оборудования ускоряется в K_y^T раз:

$$K_y^T = e^{\frac{E_a}{K_B} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}, \quad (5-1)$$

где E_a – энергия активации дефекта, K_B – постоянная Больцмана. При повышении температуры на 10 °С старение ускоряется примерно в 2 раза. Учитывая, что температура

внутри ОМ в режиме эксплуатации в оз. Байкал составляет величину около 10 °С, нагревание до 60 °С обеспечивает фактор ускорения старения ~ 30.

Собранные блоки электроники ОМ подвергаются температурным испытаниям. В качестве температурного стенда используется металлический шкаф с нагревательным элементом в нижней части корпуса, приточным вентилятором и вытяжным отверстием. Температурные испытания проводятся при температуре ~ 60 °С в течение не менее 24 часов. Это соответствует примерно месяцу работы ОМ в реальных условиях. Этот срок можно считать достаточным для выявления “ранних” отказов электроники и выходом ее на режим работы, в котором вероятность выхода из строя не зависит от времени.

В температурном стенде может быть размещено до 24 блоков электроники (2 секции ОМ). Все тестируемые блоки подключены к общему источнику питания и управляющему компьютеру. Во время температурных испытаний производится мониторинг всех доступных параметров блока электроники (величина высоковольтного напряжения, температура контроллера, напряжение питания на контроллере и т. п.). В случае установленных дополнительных датчиков температуры, влажности, ускорения свободного падения, также снимают их показания.

Примеры временных зависимостей параметров ОМ, полученных при проведении температурных испытаний, представлены на рисунке 5-5. Следует отметить высокую стабильность значения высоковольтного напряжения в ходе испытаний.

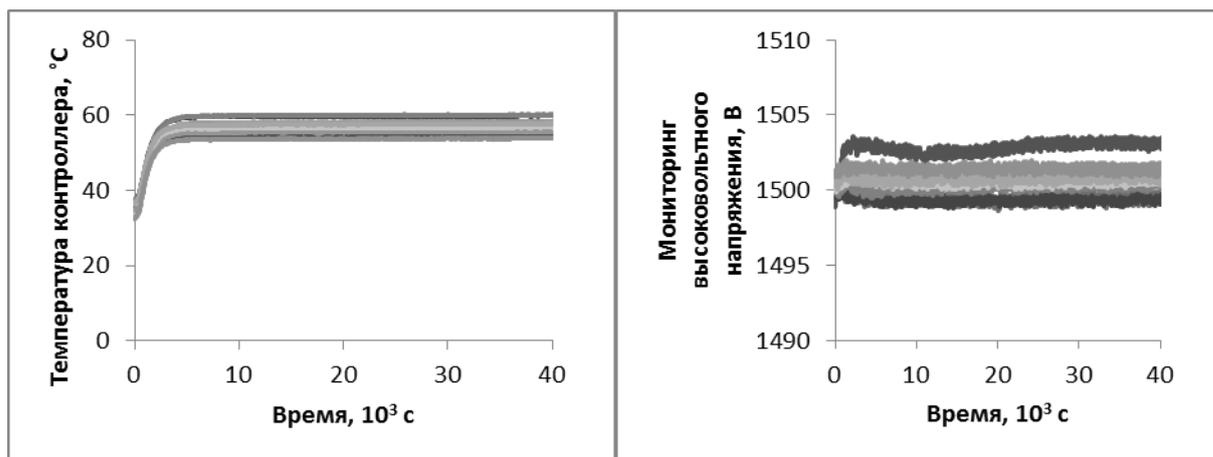


Рисунок 5-5 – результаты температурных испытаний для 10 блоков электроники ОМ: температура микросхемы контроллера ОМ (слева) и величина высоковольтного напряжения (справа)

После испытаний всех основных элементов производится сборка ОМ – блок электроники монтируется на цоколь фотоэлектронного умножителя, установленного в

глубоководном корпусе, и производится подключение блока к выходному глубоководному разъему посредством кабеля SMA-SMA и многожильных проводов.

Процедуры тестирования и калибровки собранного ОМ подробно описаны в главе 4 «Исследования параметров». После комплексной проверки ОМ производится герметизация глубоководного корпуса и откачка модуля до давления $\sim 0,7$ атм для надежной фиксации полусфер и герметизация герленом границы раздела глубоководного корпуса ОМ. Давление внутри ОМ контролируется при помощи манометра. Стабильные показания манометров ОМ в течение суток указывают на надежную герметизацию модулей. После откачки воздуха производится контроль сопротивления на контактных парах: сигнал, питание, шины интерфейса RS-485. Устанавливается рама. В таком состоянии модули хранятся и перевозятся в специальных деревянных ящиках.

После транспортировки оптических модулей на оз. Байкал они проходят трех-этапную процедуру проверки. Первый этап – оперативный тест ОМ с включением высоковольтного напряжения. Второй этап – проверка работы ОМ, установленного на гирлянду (непосредственно перед погружением). Последний этап – проверка всех ОМ секции после ее полного монтажа.

Оперативный тест проводится после откачки ОМ и после транспортировки на оз. Байкал. Процедура полностью автоматизирована, ее продолжительность не более 4-х минут на модуль. Все результаты проверки фиксируются в банке данных ОМ.

Управление и измерение параметров ОМ во время оперативной проверки производится так же, как и при полной проверке оптического модуля (см. главу 4 «Исследования параметров»). В частности, используется осциллограф того же типа (LeCroy HDO4034). Оперативная проверка ОМ включает в себя следующую последовательность процедур:

- 1) проверка связи с контроллером ОМ;
- 2) проверка генерации синхроимпульсов контроллером ОМ;
- 3) проверка генерации проверочного импульса контроллером ОМ;
- 4) проверка системы управления высоковольтным напряжением: сравнение величины установленного и измеренного значения напряжения;
- 5) проверка спектрометрического канала ОМ по регистрации шумов ОМ;
- 6) проверка работы светодиодов;
- 7) проверка системы управления задержкой второго светодиода;

- 8) измерение зависимости скорости счета шумов от порога по счетчику контроллера ОМ при выключенном и включённом высоковольтном напряжении;
- 9) измерение уровня шумов ОМ;
- 10) проверка выключения высоковольтного напряжения;
- 11) заключение о состоянии ОМ.

Пример результатов оперативной проверки представлен в таблице 5-3.

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 было выявлено неисправности в узлах управления контроллера и отбраковано два комплекта электроники ОМ.

Таблица 5-3 – результаты оперативной проверки ОМ

channel	controller	Date & time	main components			for full test	High voltage	monitor on HV	monitor off HV	Link of controller	Link of trigger							
3	60	25.03.2015 17:19	ИСТИНА			ЛОЖЬ	900	897.2	0.4	60	FAIL							
1	30	25.03.2015 17:17	ИСТИНА			ЛОЖЬ	900	899.5	5.12	30	FAIL							
4	85	25.03.2015 11:03	ИСТИНА			ЛОЖЬ	900	898.8	8.22	85	FAIL							
1	50	25.03.2015 11:02	ИСТИНА			ЛОЖЬ	900	898.4	9.29	50	FAIL							
4	34	25.03.2015 10:14	ИСТИНА			ЛОЖЬ	900	898.8	4.31	34	FAIL							
3	93	25.03.2015 10:11	ИСТИНА			ЛОЖЬ	900	899	4.91	93	FAIL							
1	66	25.03.2015 10:09	ИСТИНА			ЛОЖЬ	900	903.7	3.92	66	FAIL							
3	56	25.03.2015 10:05	ИСТИНА			ЛОЖЬ	900	900.4	4.3	56	FAIL							
4	22	22.03.2015 7:05	ИСТИНА			ЛОЖЬ	900	898.7	3.52	22	FAIL							
3	45	22.03.2015 7:03	ИСТИНА			ЛОЖЬ	900	898.6	6.23	45	FAIL							
2	36	22.03.2015 7:02	ИСТИНА			ЛОЖЬ	900	899.2	6.5	36	FAIL							
amplitude (test puls)	area (test puls) (ns)	width (test puls) (ns)	rise (test puls) (ns)	amplitude (signal)	area (signal) (ns)	width (signal) (ns)	rise (signal) (ns)	amplitude (LED1)	area (LED1) (ns)	width (LED1) (ns)	rise (LED1) (ns)	amplitude (LED2)	area (LED2) (ns)	width (LED2) (ns)	rise (LED2) (ns)	set delay (ns)	measured delay (ns)	Noise (kHz)
0.385	-31.6	92.9	51.63	0.134	-6.31	42.81	22.93	2.618	-2330	194.5	47.7	2.617	-2317	189.9	47.63	949.4	949.6	1.48
0.391	-32.1	92.69	49.13	0.262	-11.8	40.91	19.25	2.775	-1483	150.8	43.45	2.787	-1567	177.8	44.32	949.4	937.6	1.81
0.379	-33.4	92.64	50.3	0.208	-8.23	34.09	14.18	2.632	-2292	179	46.48	2.631	-2323	183.8	46.63	949.4	946.5	2.2
0.39	-32.9	92.63	48.69	0.226	-8.21	32.93	14.16	2.75	-1574	181.4	45.41	2.752	-1577	181.4	45.46	949.4	938.7	7.57
0.378	-33.6	92.49	49.16	0.152	-5.29	32.17	15.09	2.637	-2238	154.3	45.76	2.642	-2348	191.4	46.51	949.4	944.7	0.02
0.384	-33.1	92.77	50.66	0.162	-6.1	34.56	16.45	2.636	-2274	179.2	46.29	2.636	-2279	178	46.19	949.4	947.3	0.1
0.39	-32.7	92.71	48.48	0.193	-8.06	37.56	18.95	2.757	-1547	174.1	44.16	2.758	-1561	181.4	44.51	949.4	938.5	11.04
0.387	-32.8	92.87	51.08	0.204	-7.99	35.16	16.49	2.65	-2330	198.7	47.61	2.648	-2307	190.9	47.58	949.4	949.5	5.51
0.417	-34.7	92.47	47.87	0.227	-9.72	38.21	17.02	2.781	-2402	207.6	45.83	2.792	-2355	189.5	45.73	949.4	946.9	0.61
0.385	-30.6	92.84	50.96	0.255	-11.9	39.92	16.4	2.659	-2348	205.8	47.28	2.656	-2314	196.8	47.55	949.4	949.9	0.85
0.374	-25.8	92.89	50.3	0.131	-6.79	35.38	17.27	2.679	-2530	169	46.58	2.652	-2537	169.1	45.98	949.4	947.4	0.08

Глава 6. Натурные испытания

Работы над созданием Baikal-GVD проводятся с 2009 года. В течение первых трех лет были разработаны и испытаны в оз. Байкал основные элементы нейтринного телескопа: оптические модули, модули и аппаратура системы сбора данных, система глубоководных кабельных коммуникаций и подготовлен технический проект установки. В 2012 году было начато создание первого кластера Baikal-GVD, который был введен в эксплуатацию в 2015 году. Основные этапы создания кластера представлены на рисунке 6-1.

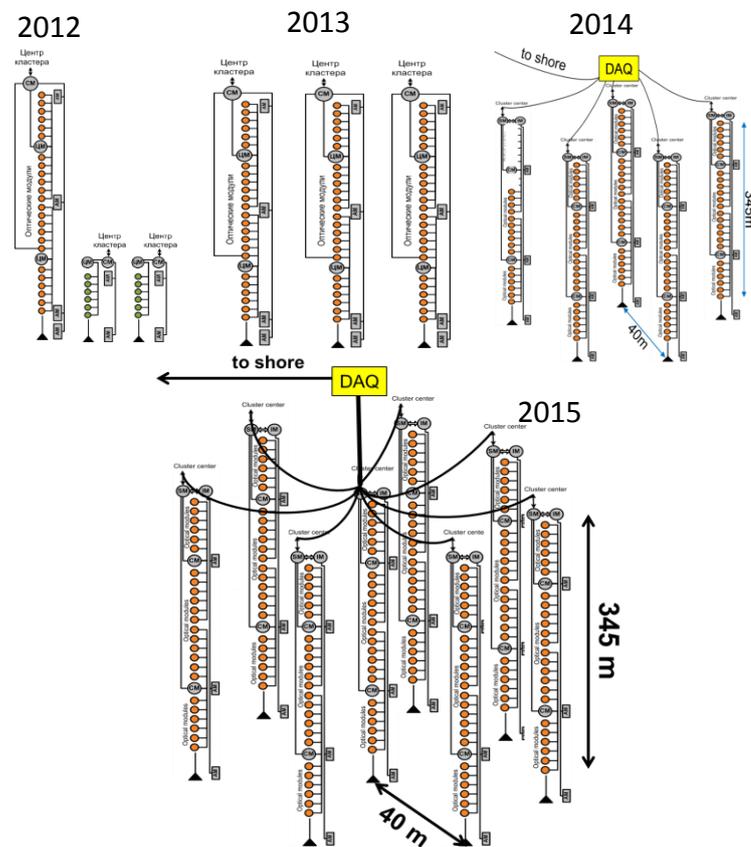


Рисунок 6-1 – основные этапы создания первого кластера Baikal-GVD

В 2012 году была введена в эксплуатацию первая полномасштабная гирлянда телескопа с 24 оптическими модулями на базе ФЭУ R7081-NQE. На основании опыта ее эксплуатации была модернизирована электроника обработки данных каналов. В частности, в 2013 году была увеличена мощность микросхем FPGA плат АЦП (Spartan 3 заменен на Spartan 6). Это позволило улучшить дискретность мониторинговых гистограмм каналов и вести обработку данных каналов в режиме реального времени. Обработка данных представляет собой выделения сигналов из временных кадров АЦП, что позволяет передавать на берег только полезную

информацию (фактор сжатия данных составляет при этом величину $\sim 10^2$). В 2014 году были испытаны первые платы 12-канальных АЦП на базе 2-х канальных 12-битных микросхем AD9613. Это позволило объединить пять плат сбора данных секции (три платы АЦП, плата Мастер и Кросс-плата) в одну. При этом потребление этого узла уменьшилось на 50 %. Испытания новой электроники прошло достаточно успешно и в 2015 году три гирлянды кластера были полностью оснащены 12-канальными платами АЦП. Следует отметить, что проводилась модернизация только узлов электроники системы сбора и передачи данных. Версия электроники оптических модулей с 2012 года не менялась. Единственное изменение ОМ в этот период касается фотоэлектронного умножителя. ФЭУ R7081-HQE, используемые в установке до 2013 года, рассматривались изготовителем (HAMAMATSU) как опытные образцы. С 2013 года эти ФЭУ были поставлены на поточное производство (без изменения технических характеристик) и название их серии было изменено производителем на R7081-100.

Полномасштабный кластер Baikal-GVD был введен в эксплуатацию в апреле 2015 года [14, 79, 87–89]. Схематический вид кластера показан в нижней части рисунка 6-1. Радиус кластера 40 метров, высота кластера (длина гирлянд) 345 метров, общее количество оптических модулей 192 шт. Расстояние от верхних ОМ до поверхности озера около 1 км.

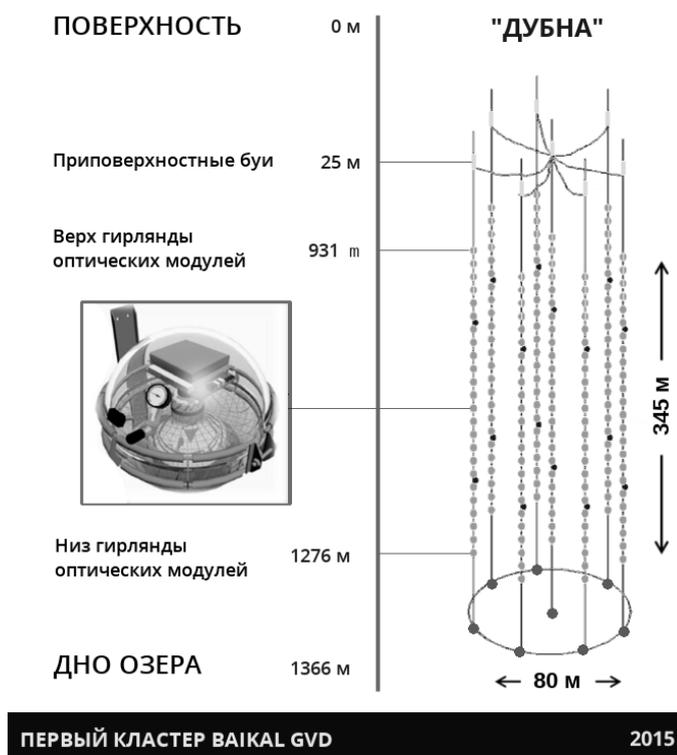


Рисунок 6-2 – базовая конфигурация кластера Baikal-GVD

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 8 гирляндах. Каждая гирлянда состоит из трех секций (по 12 ОМ), 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.

§ 1. Мониторинг параметров ОМ

Задачей системы мониторинга ОМ является периодическое измерение их параметров и проверка их соответствия номинальным значениям. Информация о состоянии и качестве работы аппаратуры оптических модулей формируется в мониторинжной системе контроллеров. Мониторные данные записываются в информационные блоки и транслируются в Береговой центр сбора данных каждые 10 – 20 минут во время работы установки.

В информационном блоке для каждого ОМ содержатся следующие данные:

- номер контроллера, идентифицирующий оптический модуль;
- время измерения;
- величины напряжения электропитания ОМ: +5 В, -5 В, +12 В;
- значение высоковольтного напряжения ФЭУ;
- показание датчика температуры;
- состояние счетчика ошибок передачи данных контроллера;
- состояние буфера счетчика шумовых импульсов ФЭУ.

На рисунке 6-3 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.

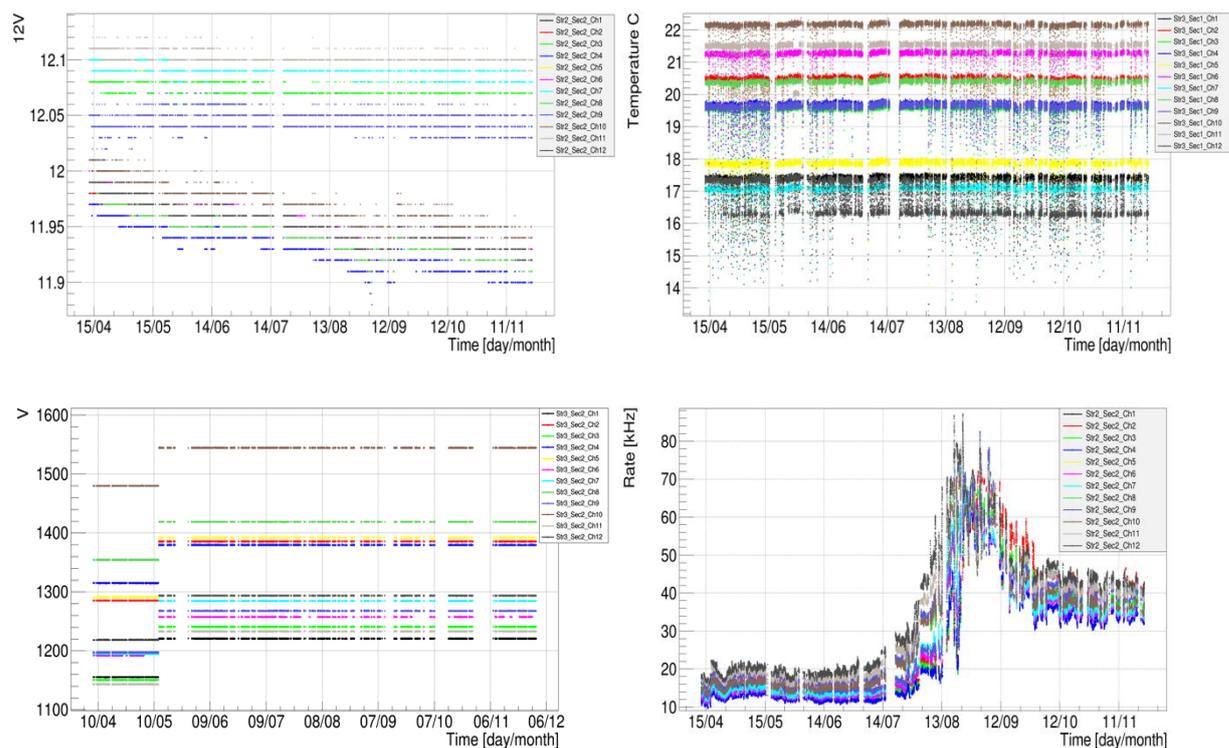


Рисунок 6-3 – данные годового мониторинга параметров ОМ: напряжения электропитания (слева сверху), температура контроллера (справа сверху), высоковольтного напряжения на ФЭУ (слева снизу) и темпа счета шумов (справа снизу)

Стабильность напряжением электропитания ОМ необходима для надежной работы электроники оптического модуля. Для электропитания оптического модуля требуется напряжение $12\text{ В} \pm 10\%$. Учитывая потери на кабелях оптических модулей (длина 90 м, ток $\sim 250\text{ мА}$) выходное напряжение источника питания устанавливалось на уровне 13 В. В течение годовой эксплуатации величина напряжения на ОМ составила величину $12 \pm 0,1\text{ В}$, что на порядок превосходит требования по стабильности напряжения. Можно отметить тенденцию к понижению напряжения на 6 из 12 ОМ. Это связано с понижением выходного напряжения на $\sim 1\%$ на одном из двух источников питания. Разброс значений напряжений на ОМ $\sim 0,2\text{ В}$ обусловлен различиями в токах потребления модулей, которые зависят от высоковольтного напряжения ФЭУ (токи потребления определяют падение напряжения на кабеле ОМ).

Измерение температуры внутри оптического модуля позволяет контролировать условия эксплуатации электроники. Глубоководные корпуса оптических модулей изготовлены из стекла, которое является плохим проводником тепла. Так же теплообмен уменьшается за счет снижения давления внутри модуля до 0,7 атм. Не смотря на то, что ОМ эксплуатируются при температуре окружающей среды $\sim 4\text{ }^\circ\text{C}$ и потребляемая мощность ОМ мала ($\sim 3\text{ Ватт}$), плохой отвод тепла может приводить к существенному повышению температуры внутри ОМ, что снижает срок службы электроники. Следует отметить, что измерения температуры проводятся

при помощи термометра, интегрированного в состав микропроцессора ОМ и (как было измерено) его показания примерно на десять градусов превышают температуру окружающей среды. Учитывая этот факт, температура внутри модуля составляет величину $\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (близка к оптимальной для работы электроники). Кратковременные снижения температуры, наблюдаемые на графике 6-3 (справа вверху), обусловлены периодическим выключением электропитания ОМ и соответствуют периодам выхода модулей на стабильный тепловой режим.

Стабильность величины высоковольтного напряжения ФЭУ является необходимым условием стабильности чувствительности установки, т. к. от него зависят коэффициенты усиления каналов и, соответственно, пороги регистрации детектора. При изменении высоковольтного напряжения на 100 В в рабочем диапазоне напряжений, амплитуда сигнала меняется в $\sim 1,8$ раза. Соответственно, для сохранения стабильности порогов регистрации на уровне 5 % необходима стабильность напряжения в пределах 7 В. Учитывая, что характерное значение высоковольтного напряжения составляет величину около 1500 В, его стабильность должна быть не хуже 0,5 %. Реально измеренные отклонения высоковольтного напряжения от требуемой величины существенно меньше требуемого уровня $< 0,1\%$. Это связано как с выбором высокостабильного источника высоковольтного напряжения ФЭУ (стабильность 0,05 % по данным производителя), так и со стабильностью температуры внутри оптического модуля (температурный коэффициент источника напряжения $\pm 0,01\% / ^{\circ}\text{C}$). Скачкообразное изменение высоковольтных напряжений (см. график 6-3 (слева снизу)) связано с изменением настроек каналов детектора.

Фотоэлектронные умножители детектора рассчитаны на регистрацию сверхслабых световых импульсов (вплоть до одного фотона), генерированных частицами космического излучения в воде. При такой высокой световой чувствительности крайне важным параметром является скорость счета шумовых (однофотоэлектронных) импульсов каналов, представляющих собой фон, не связанный с регистрацией света от физических событий. Скорость счета шумов канала влияет на работу триггерной системы установки (величину порогов регистрации), мертвое время системы сбора данных, точность реконструкции параметров физических событий. Существует два основных источника шумовых срабатываний каналов: собственный темновой ток ФЭУ и свечение воды оз. Байкал. Скорость счета фоновых импульсов, обусловленных темновым током, составляет величину $\sim 5\text{ кГц}$. Существенно больший вклад дает свечение воды. Источником света являются химические реакции, происходящие в остатках биологических образований, накапливающихся в воде (хемилюминесценция). Перенос конгломератов таких образований течениями озера

обуславливает высокий уровень флуктуаций фонового свечения и значительные сезонные вариации его средней интенсивности. Результаты годового мониторинга скорости счета шумовых срабатываний для 12 ОМ, представленные на рисунке 6-3 (справа снизу), достаточно хорошо отражают общее поведение всех каналов установки: стабильная скорость счета шумов в период апрель – июль (15 – 20 кГц для разных каналов), резкое увеличение уровня шумов в период август – сентябрь (до 60 – 70 кГц) и их дальнейшая стабилизация на уровне ~ 40 кГц. Временная корреляция шумовых пиков на разных каналах говорит о преимущественном вкладе в частоту шума естественного свечения байкальской воды.

Следует отметить, что исследование переменной составляющей фонового свечения воды оз. Байкал имеет важное прикладное значение. Наблюдение за изменениями скорости счета фона, измеренными распределенными в пространстве оптическими модулями, позволяет исследовать долговременную динамику и сезонные вариации течений на больших глубинах озера. В настоящее время создается архив данных мониторинга фоновых шумов, который будет использован для этих исследований.

Результаты мониторинга параметров оптических модулей, во-первых, указывают на корректность работы электроники ОМ: стабильность высоковольтного напряжения ФЭУ, оптимальность режима эксплуатации электроники модуля (температура внутри модулей ~ 10 °С). Во-вторых, полученные результаты подтверждают эффективность работы встроенной в ОМ системы мониторинга с точки зрения контроля условий работы оптических модулей (уровня светового фона оз. Байкал, температуры, величины напряжения электропитания).

§ 2. Работа ОМ в режиме калибровки

Работоспособность ОМ в режимах амплитудной и временной калибровок является удобным и эффективным критерием качества работы ОМ. В этих режимах задействованы (и, соответственно, проверяются) все элементы системы регистрации и управления ОМ: фотоэлектронный умножитель, контроллер ОМ, светодиодные калибровочные источники света.

Амплитудная калибровка каналов заключается в измерении коэффициентов преобразования каналов из кодов АЦП в единицы ф.э. Для этого используется стандартная методика анализа о.ф.э. спектров каналов. Измерение о.ф.э. спектров производится либо с использованием слабой подсветки от светодиода (эффективность регистрации вспышек ~ 10 %), либо по шумовым импульсам ОМ (в этом режиме производится набор кадров АЦП независимо от работы триггерной системы, по команде “внешнего запуска” измерения). Было

показано, что оба метода дают одинаковые результаты, и в данной работе представлен анализ шумовых импульсов оптических модулей.

Характерный пример о.ф.э. спектров зарядов импульсов, измеренного на канале по шумам ОМ, и форма о.ф.э. импульса, представлен на рисунке 6-4. Расчет зарядов импульсов осуществлялся по данным временных кадров, регистрируемых АЦП. По горизонтали показаны временные отсчеты АЦП (один отсчет соответствует 5 нс). По вертикали представлены амплитудные коды АЦП (один код $\sim 1,3$ мВ).

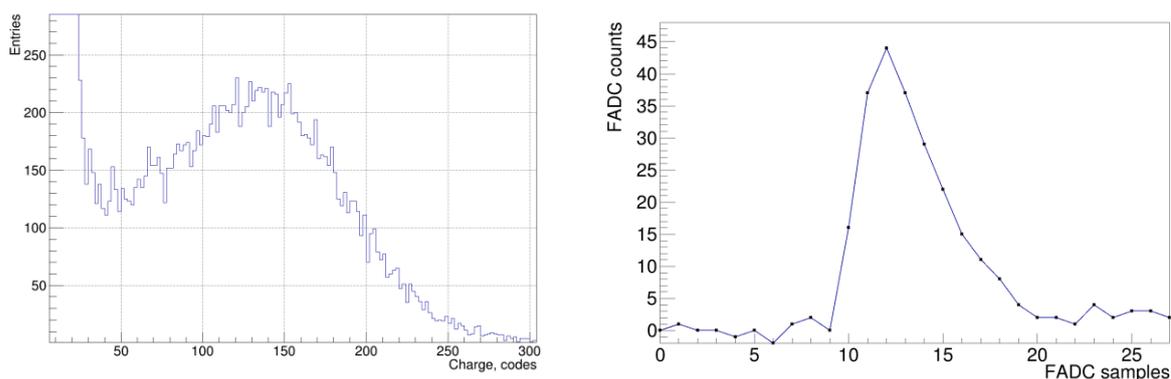


Рисунок 6-4 – пример о.ф.э. спектра канала (слева) и о.ф.э. сигнала (справа),

Аппроксимация пика о.ф.э. спектра распределением Гаусса позволяет определить средний заряд одного фотоэлектрона Q_{IE} , выраженный во временных и амплитудных отсчетах АЦП. Этот параметр используется как калибровочный коэффициент канала. Отношение Q_{IE} к заряду электрона с учетом чувствительности АЦП дает коэффициент усиления канала G . На рисунке 6-5 представлено распределение каналов по величине коэффициента усиления, полученное по калибровочным данным 2014 года.

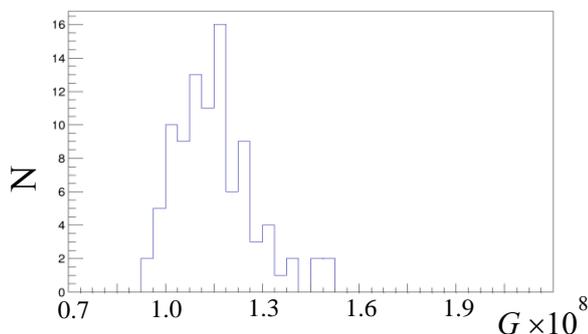


Рисунок 6-5 – распределение каналов по величине коэффициента усиления, 2014 год

Среднее значение коэффициента G по выбранному набору данных составляет величину $1,12 \times 10^8$. Это значение достаточно близко к требуемой величине коэффициента усиления

$1,0 \times 10^8$, настраиваемой на этапе лабораторной калибровки оптических модулей. Стоит также отметить, что с 2015 года производится выравнивания усиления каналов по однофотозлектронному спектру (ранее производилось по многофотозлектронному), что существенно повысило точность подбора величины высоковольтного напряжения. В таблице 6-1 представлены средние значения коэффициентов усиления каналов, полученным по трем наборам калибровочных данных. Следует отметить достаточно высокую стабильность данной характеристики ОМ.

Таблица 6-1 – усредненные коэффициенты усиления каналов, полученные по данным 2014 года

Дата измерения	12 мая 2014	10 июля 2014	21 августа 2014
$\langle G \rangle$	$1,12 \times 10^8$	$1,17 \times 10^8$	$1,14 \times 10^8$
$\langle \delta G \rangle, \%$	9,9	10,1	9,3

Амплитудная калибровка не дает информации о временных характеристиках каналов. Для полного анализа качества работы ОМ использовались данные временной калибровки, которая заключается в измерении относительных временных задержек между каналами. Величина задержки каналов определяется двумя основными факторами: задержками сигналов в кабелях ОМ и задержкой импульсов в ФЭУ. Кабельные задержки измеряются в лаборатории и не меняются во времени. Задержки ФЭУ зависят от высоковольтного напряжения на делителе и требуют постоянного контроля в процессе работы.

Применяются 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 фотоэлектронного умножителя.
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 ~ 10 см).

При анализе данных решались две задачи: анализ работоспособность каналов и оценка точности временной калибровки, обеспечиваемой калибровочной системой ОМ. Для оценки

точности временной калибровки сопоставлялись результаты, полученные двумя указанными выше методами. Анализ проводился для оптических модулей, установленных на двух гирляндах кластера Baikal-GVD в 2015 году (48 каналов). На рисунке 6-6 представлены распределения по разности задержек между соседними каналами, измеренные с помощью светодиодного источника dT_{LED} и с помощью проверочного импульса dT_{TST} .

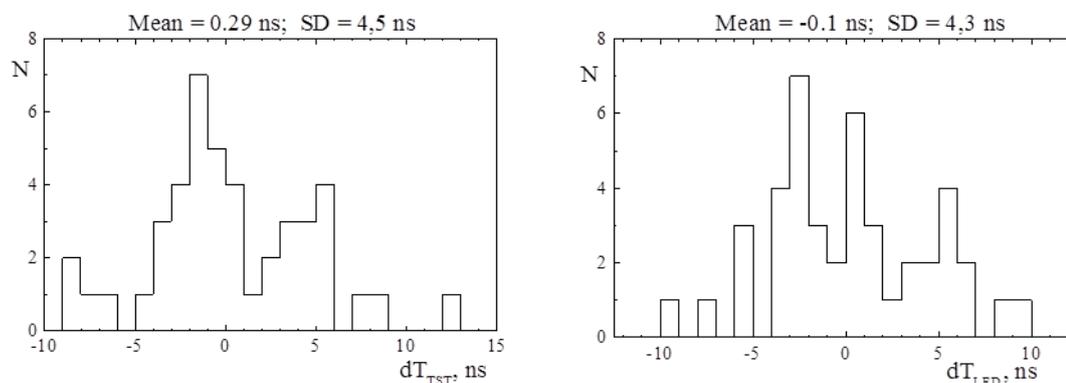


Рисунок 6-6 – распределения по разности задержек между соседними каналами, измеренные с помощью светодиодного источника dT_{LED} и с помощью проверочного импульса dT_{TST} для 48 ОМ Baikal-GVD

Также был проведен анализ зависимости dT_{TST} от напряжения на делителе ФЭУ для оптических модулей, установленных на трех гирляндах кластера Baikal-GVD. Результаты представлены на рисунке 6-7. Видно хорошее согласие полученных результатов с данными лабораторных испытаний (см. главу 4 «Исследования параметров»).

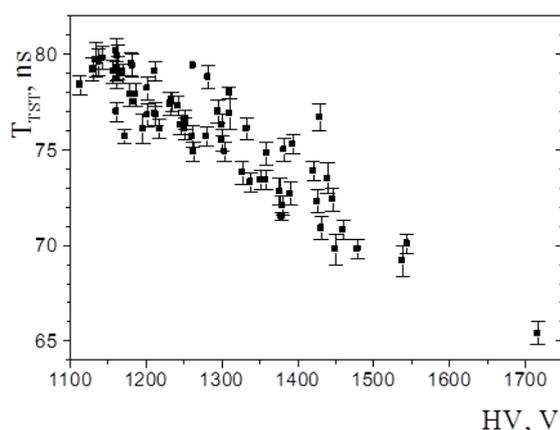


Рисунок 6-7 – временные задержки каналов, измеренные с помощью проверочного импульса, в зависимости от напряжения на делителе ФЭУ для 72 оптических модулей Baikal-GVD

§ 3. Регистрация мюонов

Исследование проблемы регистрации мюонов оптическими модулями является отдельной серьезной задачей, включающей в себя оптимизацию триггерных условий детектора,

подавление шумовых срабатываний каналов, выделение мюонных событий, реконструкцию параметров треков. В данном разделе, 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). Для этого производится сравнение экспериментально измеренных распределений межканальных задержек ΔT_{μ} с ожидаемыми распределениями, полученными методом Монте-Карло ΔT_{MC} .

Для формирования экспериментальных ΔT_{μ} распределений использовались данные, полученные при штатных триггерных условиях работы установки (совпадения соседних каналов в секциях с порогами 1,5 ф.э. и 4 ф.э.). Для зарегистрированных событий производилась режекция шумовых срабатываний каналов. Для этого использовался так называемый “принцип причинности”. Идея его заключается в том, что из всех зарегистрированных сигналов выделяется группа импульсов, разница времен между которыми не противоречит возможности их генерации частицей, двигающейся со скоростью света. Все остальные импульсы считаются шумовыми и отбрасываются. Для формирования ΔT_{μ} распределений из выделенных импульсов отбирались сигналы, заряд которых превышал порог два ф.э. Кроме того требовалось, что бы для каждого выделенного сигнала на соседних каналах присутствовали импульсы, удовлетворяющие принципу причинности.

Для формирования ожидаемых распределений межканальных задержек ΔT_{MC} использовался банк данных моделированных событий. Моделирование событий в установке включало в себя моделирование потока мюонов на уровне моря, прохождения мюонов до установки и отклика детектора. Для моделирования потока мюонов использовалась программа CORSIKA. Распространение черенковского излучения мюонов в воде моделировалось по специально созданным для Байкальского эксперимента программам. Розыгрыш отклика оптического модуля на черенковское излучение проводился с учетом квантовой и угловой чувствительности фотодетекторов. При моделировании учитывался также вклад шумовых срабатываний каналов. Отбор сигналов в моделированных событиях осуществлялся по тем же алгоритмам, как и для экспериментальных данных.

Из-за различия в длинах кабельных коммуникаций и задержках фотоэлектронных умножителей (эти параметры не учитываются при моделировании установки) экспериментальные и ожидаемые распределения межканальных задержек должны быть сдвинуты на некоторую величину T_0 . При подборе величины межканальной сдвиги T_0 требовалось, что бы ΔT_{μ} и ΔT_{MC} максимально совпадали друг с другом (использовался критерий согласия χ^2). На рисунке 6-8 представлены примеры экспериментальных и моделированных

распределений межканальных задержек после подбора оптимального значения величины межканальной сдвигки.

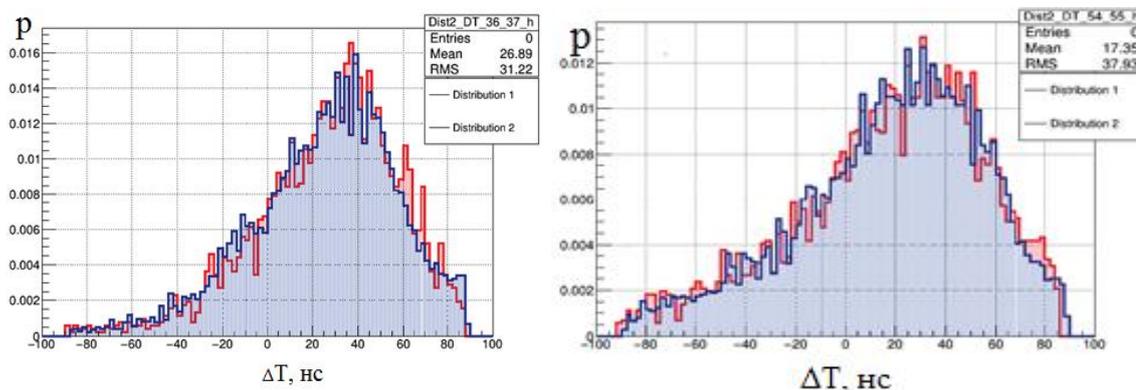


Рисунок 6-8 – примеры экспериментальных (синий цвет) и моделированных (красный цвет) распределений межканальных задержек для мюонных данных 2015 года (каналы 36/37 слева и 54/55 справа)

Экспериментальные и моделированные распределения межканальных задержек хорошо согласуются друг с другом, что указывает на корректную работу оптических модулей в режиме регистрации мюонных событий.

§ 4. Оценка надежности ОМ

Анализ надежности функционирования ОМ в составе установки был проведен на основании исследований результатов временной калибровки каналов нейтринного телескопа (измерения временной сдвигки канала T_{SHIFT}). Результаты анализа работоспособности каналов представлены на рисунке 6-9. Разброс в величинах относительных временных сдвижек каналов T_{SHIFT} определяется, главным образом, различием в величине высоковольтного напряжения на ФЭУ. Как видно из рисунка, отсутствует информация для каналов: 7, 60, 65 и 157. Для остальных 188 каналов измерения временных калибровочных коэффициентов производятся корректно.

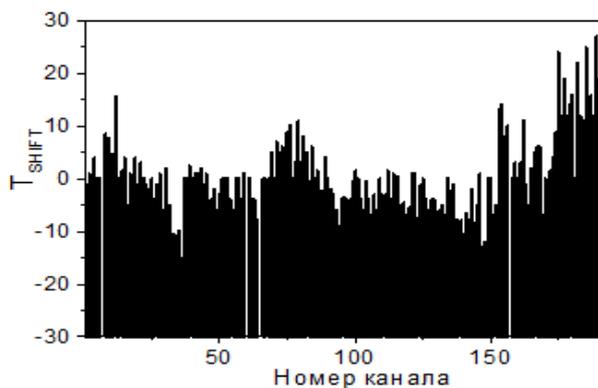


Рисунок 6-9 – временные калибровочные коэффициенты T_{SHIFT} каналов кластера Baikal-GVD

Оценка работоспособности измерительных каналов по результатам их калибровки в составе телескопа показывает, что за все время работы установки из строя вышло четыре канала (см. таблицу 6-2).

Таблица 6-2 – статистика выхода из строя измерительных каналов

Канал	7	60	65	157
Тип неисправности	Нет сигнала	Нет связи	Нет сигнала	Нет связи
Положение в детекторе	Сек. 1, кан. 7	Сек. 5, кан. 12	Сек. 6, кан. 5	Сек. 14. Кан. 1
Время установки	Апрель 2013	Апрель 2014	Апрель 2014	Апрель 2012
Причина поломки	Плохой контакт на разъеме ЦМ	Не работает контроллер ОМ	Плохой контакт на разъеме ЦМ	ПРОТЕЧКА Ошибка установки резинового кольца на разъеме ОМ

На основании результатов профилактических работ, проведенных на установке в марте-апреле 2016 года, были установлены причины выхода из строя измерительных каналов. Неисправности на двух каналах связаны с отказом оптических модулей (выход из строя контроллера ОМ и попадание воды в оптический модуль). Стоит обратить внимание, что температурные испытания для вышедшего из строя контроллера не проводились, т. к. они были введены позже. В остальных двух случаях отказы каналов связаны с отсутствием контакта в разъемах, установленных внутри центрального модуля секции, и непосредственно не связаны с работой ОМ.

В таблице 6-3 показано количество оптических модулей, установленных с 2012 года и общее время их работы. На настоящий момент времени общая наработка на отказ составляет 400 лет на один измерительный канал, что соответствует вероятности выхода из строя канала

~ 1 % в год. Вероятность выхода из строя оптических модулей составляет половину от этой величины: ~ 0,5 % в год (MTBF ~ 10^6 часов).

Таблица 6-3 – данные по работе ОМ в составе установки

Год	2012	2013	2014	2015	Общее к-во
Количество установленных ОМ	24	48	40	80	192
Время работы, год	4	3	2	1	-
Наработка ОМ (модулей×год)	96	144	80	80	400
Неисправные каналы	1	1	2	0	4
Неисправные оптические модули	1	0	1	0	2

Полученная оценка надежности не учитывает факт изменения процедур проверки и испытаний ОМ в 2014 году. 80 оптических модулей, установленных в 2015 году, были подготовлены в соответствии с новой технологией. К настоящему моменту времени (2016 г.) не зафиксировано случаев отказа ОМ из этой группы.

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.

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 (~ 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.

Конструкция оптического модуля разработана с учетом особых требований к надежности и эргономике ОМ:

 - подключения ОМ к системе сбора данных телескопа осуществляется через один глубоководный разъём с возможностью «мокрого» присоединения;
 - обеспечена простота сборки ОМ и монтажа к несущему кабелю гирлянды телескопа;
 - минимизировано затемнения ОМ конструктивными элементами (рамой, бандажом, блоком электроники), что обеспечивает улучшение его угловых характеристик.
3. Оптический модуль является функционально законченным прибором, оснащенным системой управления режимами работы и контроля параметров, калибровочной системой (измерение задержки ОМ с точностью ~ 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.
4. 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 %.

5. Представленный в работе ОМ был детально изучен и охарактеризован в контексте физических задач, решаемых на нейтринном телескопе Baikal-GVD. Были проведены измерения основных параметров ОМ: темновой скорости счета сигналов, формы импульсов в однофотоэлектронном и многофотоэлектронном режимах работы, временного разрешения, отклика на “большие” световые импульсы (работа в режиме “насыщения”), параметры послеимпульсов, угловой зависимости отклика ОМ. Результаты этих исследований могут быть использованы для детального моделирования физических событий, регистрируемых Baikal-GVD.
6. Проведены лабораторные испытания и паспортизация более 300 оптических модулей и создан архив данных параметров ОМ.
7. Налажена процедура подготовки ОМ в условиях массового производства. 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).
8. Подготовлены оптические модули для первого кластера Baikal-GVD. В настоящее время в состав кластера входит 288 ОМ.
9. Проведены долговременные натурные испытания надежности оптических модулей. Суммарное время наработки ОМ составило ~ 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 %).
10. 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 ~ 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.

В заключение я хотел бы поблагодарить заведующего лабораторией нейтринной астрофизики высоких энергий Г. В. Домогацкого – руководителя Байкальского эксперимента, без которого выполнение данной работы было бы невозможным. Искренне благодарю Н. А. Айрапетову за неоценимую поддержку и внимание на всех этапах работы. Отдельно выражаю глубокую благодарность своему научному руководителю В. М. Айнутдинову за постановку задачи, ценные советы и всестороннюю помощь. Я благодарен своим коллегам Голубкову К. В., Кошелю Ф. К., Кошечкину А. П., Кулешову Д. А., Ляшуку В. И., Шелепову М. Д. за качественную подготовку оптических модулей, их компонент и другого оборудования обеспечивающего работу ОМ. Благодарю Панфилова А. И. и Миленина М. Б. за ценные конструкторские решения и необходимые обсуждения. Также благодарю И. А. Белолоптикова, Ж.-А. М. Джилкибаева, Б. А. Шайбонова и Аврорина А. Д. за анализ данных эксперимента, позволивший провести исследования эффективности работы ОМ. Благодарю сотрудников НИИЯФ МГУ А. В. Скурихина и В. А. Кожина за разработку и создание ключевых элементов системы сбора данных телескопа. Выражаю признательность Е. Н. Плисковскому за подготовку программного обеспечения для управления аппаратным комплексом детектора, а также Суворову О. В. за полезные обсуждения работы и поддержку. С теплыми чувствами автор вспоминает ушедшего из жизни Жукова В. А. Благодарю всех сотрудников сотрудничества Байкал, в соавторстве с которыми выполнена большая часть работ по теме диссертации, за помощь и полезные замечания по ходу работы. Благодарю мою семью и, в особенности, свою жену Зульфию за поддержку моих стремлений и помощь в трудные моменты.

Список иллюстративного материала и таблиц

РИСУНОК 1-1 – УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЛИВНЕЙ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ	15
РИСУНОК 1-2 – СПЕКТРАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОГЛОЩЕНИЯ (А) И РАССЕЯНИЯ (Б) БАЙКАЛЬСКОЙ ВОДЫ, АНТАРКТИЧЕСКОГО ЛЬДА (AMANDA) И ВОДЫ СРЕДИЗЕМНОГО МОРЯ (ANTARES) [19]	16
РИСУНОК 1-3 – РАСЧЕТНОЕ ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОТКЛИКА ОМ НА РАССТОЯНИИ ОТ ТРАЕКТОРИИ МЮОНА 25 М И НАПРАВЛЕНИИ ОМ ПРОТИВ ДВИЖЕНИЯ МЮОНА И ПО ДВИЖЕНИЮ МЮОНА (1 – БАЙКАЛЬСКАЯ ВОДА, 2 – СРЕДИЗЕМНОМОРСКАЯ ВОДА, 3 – АНТАРКТИЧЕСКИЙ ЛЁД) [22]	18
РИСУНОК 1-4 – ПРИВЕДЕННЫЕ ВРЕМЕННЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКЛИКОВ ОМ В РАЗНЫХ СРЕДАХ НА РАССТОЯНИИ 100 М (СЛЕВА) И 200 М (СПРАВА) ОТ ЛИВНЯ [22]	18
РИСУНОК 1-5 – ОТКЛИК СФЕРИЧЕСКОГО ОМ НА РАССТОЯНИИ 20 И 200 М (БАЙКАЛ). СПЛОШНАЯ И ПУНКТИРНАЯ КРИВЫЕ ОТНОСЯТСЯ, СООТВЕТСТВЕННО, К СЛУЧАЯМ БЕЗ УЧЕТА И С УЧЕТОМ РАССЕЯНИЯ [22]	19
РИСУНОК 1-6 – ОТКЛИК СФЕРИЧЕСКОГО ОМ НА РАССТОЯНИИ 20 И 200 М (AMANDA). СПЛОШНАЯ И ПУНКТИРНАЯ КРИВЫЕ ОТНОСЯТСЯ, СООТВЕТСТВЕННО, К СЛУЧАЯМ БЕЗ УЧЕТА И С УЧЕТОМ РАССЕЯНИЯ [22]	19
РИСУНОК 1-7 – СПОСОБЫ УСТАНОВКИ ОМ НЕЙТРИННЫХ ТЕЛЕСКОПОВ: КМЗNET (СЛЕВА), НТ-200 И ANTARES (В ЦЕНТРЕ), NESTOR (СПРАВА)	21
РИСУНОК 1-8 – СКВАЖИНА ДЛЯ РАЗВЕРТЫВАНИЯ ГИРЛЯНДЫ ОМ В АНТАРКТИДЕ	22
РИСУНОК 1-9 – МЕТОДИКА РАЗВЕРТЫВАНИЯ ГИРЛЯНДЫ КМЗNET В СРЕДИЗЕМНОМ МОРЕ	22
РИСУНОК 1-10 – МЕТОДИКА РАЗВЕРТЫВАНИЯ ГИРЛЯНД ОМ БАЙКАЛЬСКОГО НЕЙТРИННОГО ТЕЛЕСКОПА ПРИ ПОМОЩИ ЛЕБЁДОК	23
РИСУНОК 1-11 – КВАЗИСФЕРИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ (СЛЕВА) И ГИРЛЯНДА МОДУЛЕЙ (СПРАВА) УСТАНОВКИ НЕВОД	24
РИСУНОК 1-12 – СХЕМА (СЛЕВА) [33] И ФОТОГРАФИЯ (СПРАВА) [34] ОПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ПРОЕКТА AMANDA	25
РИСУНОК 1-13 – СХЕМА (СЛЕВА) [36] И ФОТОГРАФИЯ (СПРАВА) [37] ОПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ПРОЕКТА ICESUBE	26
РИСУНОК 1-14 – СРЕДНИЕ СИГНАЛЫ ДЛЯ СВЕТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ ШИРИНОЙ 3 НС: (А) ОСНОВНОЙ ПИК; (В) ВТОРИЧНЫЙ ПИК ИЗ-ЗА ИСКАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ТРАЕКТОРИЙ; (С) ПРЕДИМПУЛЬСЫ [38]	29
РИСУНОК 1-15 – ФОРМА ПОСЛЕИМПУЛЬСОВ ФЭУ ДЛЯ ЯРКИХ ВСПЫШЕК ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ 40 НС [38]	29
РИСУНОК 1-16 – ПРОЕКТ ЦИФРОВОГО ОПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ С 41 ФЭУ ДИАМЕТРОМ 3"	29
РИСУНОК 1-17 – ПРОЕКТ ОМ С ДВУМЯ ФЭУ ДИАМЕТРОМ 8"	30
РИСУНОК 1-18 – ЭСКИЗ КОНСТРУКЦИИ ОМ С ШИФТЕРОМ	30

РИСУНОК 1-19 – СХЕМА (СЛЕВА), ФОТОГРАФИЯ (ПО ЦЕНТРУ) И СХЕМА РАСПОЛОЖЕНИЯ ОМ ANTARES	31
РИСУНОК 1-20 – СХЕМА ОПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ NESTOR	33
РИСУНОК 1-21 – СХЕМА (СЛЕВА), ФОТОГРАФИЯ (ПО ЦЕНТРУ) И СХЕМА РАСПОЛОЖЕНИЯ ОМ НЕМО	36
РИСУНОК 1-22 – СХЕМА ОМ НТ-200: 1 – СТЕКЛЯННАЯ ПОЛУСФЕРА; 2 – КВАЗАР – 370; 3, 4, 5, 6 – ГЛУБОКОВОДНЫЕ РАЗЪЕМЫ; 7 – СВЕТОДИОД; 8, 9 – ИСТОЧНИКИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ; 10 – МАНОМЕТР; 11 – ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ПОЛУСФЕРЫ; 12 – ПОЛИУРИТАНОВАЯ ПЛЕНКА; 13 – ГЛИЦЕРИН	37
РИСУНОК 1-23 – ФОТОГРАФИЯ ПАРЫ ОМ, ОРИЕНТИРОВАННЫХ ФОТОКАТОДАМИ ВВЕРХ. НА ФОТОГРАФИИ ВИДНЫ ЧЕТЫРЕ ГЛУБОКОВОДНЫХ РАЗЪЕМА НА КАЖДОМ ОМ, МАНОМЕТР И МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ДУГИ С "П-ОБРАЗНЫМ" ПРОФИЛЕМ ДЛЯ КРЕПЛЕНИЯ ОМ К ТРОСУ	38
РИСУНОК 1-24 – ФОТОГРАФИЯ (СЛЕВА) И СХЕМА (СПРАВА) ОМ КМЗНЕТ	40
РИСУНОК 2-1 – МЕСТО РАСПОЛОЖЕНИЯ БАЙКАЛЬСКОЙ НЕЙТРИННОЙ ОБСЕРВАТОРИИ	49
РИСУНОК 2-2 – БАЗОВАЯ КОНФИГУРАЦИЯ КЛАСТЕРА BAICAL-GVD	51
РИСУНОК 2-3 – БЛОК-СХЕМА СЕКЦИИ BAICAL-GVD	52
РИСУНОК 2-4 – ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ОДНОГО КАНАЛА ПЛАТЫ АЦП	52
РИСУНОК 3-1 – МОДЕЛЬ ОПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ (СЛЕВА) И ФОТОГРАФИЯ ОПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ СМОНТИРОВАННОГО НА ГИРЛЯНДЕ (СПРАВА)	56
РИСУНОК 3-2 – ЗАВИСИМОСТЬ ОПТИЧЕСКОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ БОРОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА VITROVEX ОТ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ	57
РИСУНОК 3-3 – ЧЕРТЕЖ ГЛУБОКОВОДНОГО КОРПУСА ОМ	59
РИСУНОК 3-4 – ЧЕРТЕЖИ ГЛУБОКОВОДНОГО РАЗЪЕМА И ЕГО ПОСАДОЧНОГО МЕСТА НА КОРПУСЕ	61
РИСУНОК 3-5 – СХЕМЫ "СУХОГО" (СВЕРХУ) И "МОКРОГО" (СНИЗУ) СОЕДИНЕНИЯ РАЗЪЕМА	62
РИСУНОК 3-6 – ФОТОГРАФИЯ МАГНИТНОГО ЭКРАНА	65
РИСУНОК 3-7 – ПРОТОТИПЫ ОМ НА БАЗЕ ФЭУ PHOTONIS XR1807 (СЛЕВА), НАМАМАТСU R8055 (В ЦЕНТРЕ) И НАМАМАТСU R7081HQE (СПРАВА)	66
РИСУНОК 3-8 – ЗАВИСИМОСТЬ КВАНТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФЭУ НАМАМАТСU R7081 ОТ ДЛИНЫ ВОЛНЫ	67
РИСУНОК 3-9 – ФОТОГРАФИЯ ФЭУ НАМАМАТСU R7081-100	67
РИСУНОК 3-10 – РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ ПО ПАРАМЕТРАМ: Q_{\max} (СЛЕВА) И $h\nu$ (СПРАВА)	69
РИСУНОК 3-11 – РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ ПО ПАРАМЕТРАМ: P/V (СЛЕВА) И TTS (СПРАВА)	70
РИСУНОК 3-12 – РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ ПО ПАРАМЕТРУ DARK COUNTS	70
РИСУНОК 3-13 – ВЫХОДНОЙ РАЗЪЕМА И КОЛБА ФЭУ R7081	71
РИСУНОК 3-14 – КОММУТАЦИОННАЯ ПЛАТА ДЛЯ ПОДСОЕДИНЕНИЯ БЛОКА ЭЛЕКТРОНИКИ ОМ К ГЛУБОКОВОДНОМУ РАЗЪЕМУ	71
РИСУНОК 3-15 – БЛОК ЭЛЕКТРОНИКИ ОМ, УСТАНОВЛЕННЫЙ НА ЦОКОЛЕ ФЭУ	72
РИСУНОК 3-16 – БЛОК-СХЕМА ЭЛЕКТРОНИКИ ОМ	72
РИСУНОК 3-17 – СХЕМА ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ФЭУ	73

РИСУНОК 3-18 – ОБЩИЙ ВИД И ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ УСИЛИТЕЛЯ, ИЗМЕРЕННЫЕ ПРИ ПОМОЩИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЦИФРОВОГО ОСЦИЛЛОГРАФА	74
РИСУНОК 3-19 – СХЕМА УСИЛИТЕЛЯ ОМ	75
РИСУНОК 3-20 – ТИПОВЫЕ ЗАВИСИМОСТИ АМПЛИТУДЫ (А) И ШИРИНЫ (W) ВЫХОДНОГО СИГНАЛА УСИЛИТЕЛЯ ОТ АМПЛИТУДЫ ВХОДНОГО СИГНАЛА (СЛЕВА) И ЗАРЯДА ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ОТ ЗАРЯДА ВХОДНОГО СИГНАЛА (СПРАВА)	75
РИСУНОК 3-21 – ТИПОВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЗАДЕРЖКИ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА УСИЛИТЕЛЯ ОТ АМПЛИТУДЫ ВХОДНОГО СИГНАЛА	76
РИСУНОК 3-22 – ФОРМЫ ИМПУЛЬСОВ ОМ ДЛЯ СИГНАЛОВ, СООТВЕТСТВУЮЩИХ ~ 1 Ф.Э., ~ 22 Ф.Э., ~ 48 Ф.Э. И ~ 1440 Ф.Э.	77
РИСУНОК 3-23 – ФОТОГРАФИЯ (СЛЕВА) И СХЕМА (СПРАВА) СВЕТОДИОДНОГО КАЛИБРОВОЧНОГО ИСТОЧНИКА	78
РИСУНОК 3-24 – ЗАВИСИМОСТЬ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТОДИОДА KINGBRIGHT L7113 PBC-A ОТ ДЛИНЫ ВОЛНЫ	78
РИСУНОК 3-25 – РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО ДЛИТЕЛЬНОСТИ СИГНАЛОВ СВЕТОДИОДОВ KINGBRIGHT L7113 PBC-A	79
РИСУНОК 3-26 – ЗАВИСИМОСТЬ ОТКЛИКА ОМ ОТ УГЛА ПАДЕНИЯ СВЕТА НА ФОТОКАТОД Ф	82
РИСУНОК 4-1 – СХЕМА СТЕНДА ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПРОВЕРКИ ОМ	85
РИСУНОК 4-2 – ФОТОГРАФИЯ СТЕНДА	85
РИСУНОК 4-3 – UML-ДИАГРАММА КЛАССОВ ПРОГРАММЫ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ОМ НЕЙТРИННОГО ТЕЛЕСКОПА ВАКАЛ-GVD (SCOM)	90
РИСУНОК 4-4 – АЛГОРИТМ НАСТРОЙКИ ДИАПАЗОНОВ ИЗМЕРЕНИЙ	91
РИСУНОК 4-5 – АЛГОРИТМ ПОДБОРА КОДА СВЕТОДИОДА	93
РИСУНОК 4-6 – ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТОВ УСИЛЕНИЯ ОМ ОТ ВЕЛИЧИНЫ НАПРЯЖЕНИЯ НА ФЭУ ДЛЯ 87 ОМ	97
РИСУНОК 4-7 – ЗАВИСИМОСТЬ ДЛИТЕЛЬНОСТИ СИГНАЛА ОМ ОТ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ	97
РИСУНОК 4-8 – ЗАВИСИМОСТЬ ЗАДЕРЖКИ СИГНАЛОВ В ОМ ОТ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ФЭУ	98
РИСУНОК 4-9 – ШУМЫ ЭЛЕКТРОНИКИ СТЕНДА	99
РИСУНОК 4-10 – МЕТОДИКА ОТБОРА О.Ф.Э. ИМПУЛЬСОВ ПО ЗНАЧЕНИЯМ СИГНАЛА В ОПРЕДЕЛЕННОМ ВРЕМЕННОМ ОКНЕ (ФИЛЬТРАЦИЯ ШУМОВ)	99
РИСУНОК 4-11 – РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КАНАЛОВ ПО ПОДОБРАННОМУ КОЭФФИЦИЕНТУ УСИЛЕНИЯ	100
РИСУНОК 4-12 – ХАРАКТЕРНОЕ О.Ф.Э. ЗАРЯДОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИ КОЭФФИЦИЕНТЕ УСИЛЕНИЯ ОМ ~ 10 ⁸ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЬЕДЕСТАЛА (СЛЕВА), РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОМ ПО ВЕЛИЧИНЕ О.Ф.Э. РАЗРЕШЕНИЯ (СПРАВА)	101
РИСУНОК 4-13 – РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАДЕРЖКИ СИГНАЛА ДЛЯ ОДНОГО ОМ (СЛЕВА) И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОМ ПО ПОЛОЖЕНИЮ МАКСИМУМА В РАСПРЕДЕЛЕНИИ ЗАДЕРЖЕК (СПРАВА)	102
РИСУНОК 4-14 – ЗАДЕРЖКИ ВСЕХ ОМ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ДЕЛИТЕЛЕ ФЭУ	103
РИСУНОК 4-15 – РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОМ ПО ВЕЛИЧИНЕ ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ	103

РИСУНОК 4-16 – ПАРАМЕТРЫ О.Ф.Э. СИГНАЛОВ: ПОЛНАЯ ШИРИНА НА ПОЛУВЫСОТЕ, ПЕРЕДНИЙ ФРОНТ, ЗАДНИЙ ФРОНТ, АМПЛИТУДА: СЛЕВА – ТИПОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА ДЛЯ ОДНОГО ИЗ ОМ, СПРАВА – РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОМ ПО СРЕДНИМ ЗНАЧЕНИЯМ УКАЗАННЫХ ПАРАМЕТРОВ	104
РИСУНОК 4-17 – ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ОМ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ИЗМЕРЕННАЯ ДВУМЯ МЕТОДАМИ: ПО О.Ф.Э. СПЕКТРАМ (КВАДРАТЫ) И С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ М.Ф.Э. ПОДСВЕТОК (РОМБЫ)	105
РИСУНОК 4-18 – ВЕЛИЧИНА О.Ф.Э. РАЗРЕШЕНИЯ ОМ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ	105
РИСУНОК 4-19 – РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯДОВ СИГНАЛОВ В РЕЖИМЕ О.Ф.Э. ПОДСВЕТКИ ДЛЯ ОДНОГО ОМ (СЛЕВА) И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОМ ПО ВЕЛИЧИНЕ ОТНОШЕНИЯ ПИК-ДОЛИНА (СПРАВА)	106
РИСУНОК 4-20 – РАЗНОСТЬ ЗАДЕРЖЕК СИГНАЛОВ ОПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ, ИЗМЕРЕННЫХ В М.Ф.Э. И О.Ф.Э. РЕЖИМАХ (СЛЕВА) И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОМ ПО ГРАНИЧНОМУ ЗНАЧЕНИЮ КОЛИЧЕСТВА Ф.Э., ДЛЯ КОТОРОГО $\Delta T < 1$ НС (СПРАВА)	107
РИСУНОК 4-21 – ТИПОВЫЕ ФОРМЫ СИГНАЛОВ ОМ	108
РИСУНОК 4-22 – АЛГОРИТМ ИЗМЕРЕНИЯ КРИВОЙ НАСЫЩЕНИЯ	109
РИСУНОК 4-23 – КРИВЫЕ НАСЫЩЕНИЯ ДЛЯ 87 ОМ И РЕЗУЛЬТАТ ИХ АППРОКСИМАЦИИ	111
РИСУНОК 4-24 – АЛГОРИТМ ВЫДЕЛЕНИЯ ПОСЛЕИМПУЛЬСОВ И РАСЧЕТА ИХ ПАРАМЕТРОВ	113
РИСУНОК 4-25 – ПРИМЕР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНЕГО ЗАРЯДА ПОСЛЕИМПУЛЬСА (СЛЕВА) И ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОСЛЕИМПУЛЬСА В ИНТЕРВАЛЕ 1 НС (СПРАВА)	114
РИСУНОК 4-26 – ДОЛЯ СУММАРНОГО ЗАРЯДА ПОСЛЕИМПУЛЬСОВ ПО ОТНОШЕНИЮ К ЗАРЯДУ ПЕРВИЧНОГО ИМПУЛЬСА	114
РИСУНОК 4-27 – РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОСЛЕИМПУЛЬСОВ В ИНТЕРВАЛЕ 1 НС ПОСЛЕ ПЕРВИЧНОГО СИГНАЛА (СВЕРХУ) И СРЕДНИЙ ЗАРЯДА ПОСЛЕИМПУЛЬСОВ (СНИЗУ)	115
РИСУНОК 4-28 – КОЛИЧЕСТВО ПОСЛЕИМПУЛЬСОВ В ИНТЕРВАЛЕ ОТ 200 ДО 25000 НС (СЛЕВА) И СРЕДНИЙ ЗАРЯД ПОСЛЕИМПУЛЬСОВ (СПРАВА) В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЗАРЯДА ПЕРВИЧНОГО ИМПУЛЬСА	116
РИСУНОК 4-29 – КОЛИЧЕСТВО ПОСЛЕИМПУЛЬСОВ (ВЕРХНИЙ РИСУНОК) И ИХ ЗАРЯД В Ф.Э. (НИЖНИЙ РИСУНОК) В ИНТЕРВАЛЕ 750 НС, ОТНЕСЕННЫЕ К КОЛИЧЕСТВУ Ф.Э. ИСХОДНОГО СИГНАЛА ДЛЯ ТРЁХ ОМ С РАЗНОЙ ДОЛЕЙ СУММАРНОГО ЗАРЯДА ПОСЛЕИМПУЛЬСОВ	117
РИСУНОК 4-30 – РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОМ ПО ЗАДЕРЖКЕ ПЕРВОГО (СЛЕВА) И ВТОРОГО (СПРАВА) СВЕТОДИОДА	118
РИСУНОК 4-31 – РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОМ ПО АМПЛИТУДЕ И ШИРИНЕ НА ПОЛУВЫСОТЕ ПРОВЕРОЧНОГО ИМПУЛЬСА	118
РИСУНОК 4-32 – РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОМ ПО ВЕЛИЧИНЕ ПЕРЕДНЕГО И ЗАДНЕГО ФРОНТА ПРОВЕРОЧНОГО ИМПУЛЬСА	119
РИСУНОК 4-33 – РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОМ ПО ЗАДЕРЖКЕ ПРОВЕРОЧНОГО ИМПУЛЬСА	119
РИСУНОК 4-34 – ТИПОВАЯ СКОРОСТЬ СЧЕТА ШУМОВ ДЛЯ ОДНОГО ИЗ ОМ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОРОГА РЕГИСТРАЦИИ: КРУЖКИ – С ВЫКЛЮЧЕННЫМ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ И РОМБЫ – С ВКЛЮЧЕННЫМ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ (СЛЕВА) И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОМ ПО СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ СЧЕТА ШУМОВ ПРИ ПОРОГЕ 30 МВ (СПРАВА)	120

РИСУНОК 4-35 – ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТОВ УСИЛЕНИЯ 32 ФЭУ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ.	121
РИСУНОК 4-36 – ЗАВИСИМОСТИ ПОЛНОЙ ШИРИНЫ СИГНАЛА (СЛЕВА) И ВРЕМЕНИ ПРИХОДА СИГНАЛА БЕЗ ВЫЧЕТА ЗАДЕРЖЕК В СТЕНДЕ (СПРАВА) ОТ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ	122
РИСУНОК 4-37 – ТИПОВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОЛНОЙ ШИРИНЫ ИМПУЛЬСА НА ПОЛУВЫСОТЕ ДЛЯ ОДНОГО ФЭУ (СЛЕВА) И ДЛЯ 32 ФЭУ (СПРАВА) ОТ ЗАРЯДА ВЫХОДНОГО СИГНАЛА	122
РИСУНОК 4-38 – ПРИМЕР ПАСПОРТА ОПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ	124
РИСУНОК 5-1 – СХЕМА ПОЭТАПНОЙ ПОДГОТОВКИ И ИСПЫТАНИЙ ОМ	126
РИСУНОК 5-2 – МОНТАЖНЫЙ СТАПЕЛЬ ДЛЯ ВКЛЕЙКИ ФЭУ И МАГНИТНОГО ЭКРАНА НА СИЛИКОНОВЫЙ ГЕЛЬ	126
РИСУНОК 5-3 – ПРИМЕР РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ БЛОКА УСИЛИТЕЛЕЙ ОМ	127
РИСУНОК 5-4 – ХАРАКТЕРНЫЙ ВИД ЗАВИСИМОСТИ ЧАСТОТЫ ОТКАЗОВ ОТ ВРЕМЕНИ	129
РИСУНОК 5-5 – РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ 10 БЛОКОВ ЭЛЕКТРОНИКИ ОМ: ТЕМПЕРАТУРА МИКРОСХЕМЫ КОНТРОЛЛЕРА ОМ (СЛЕВА) И ВЕЛИЧИНА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ (СПРАВА)	130
РИСУНОК 6-1 – ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ ПЕРВОГО КЛАСТЕРА ВАКАL-GVD	134
РИСУНОК 6-2 – БАЗОВАЯ КОНФИГУРАЦИЯ КЛАСТЕРА ВАКАL-GVD	135
РИСУНОК 6-3 – 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)	137
РИСУНОК 6-4 – ПРИМЕР О.Ф.Э. СПЕКТРА КАНАЛА (СЛЕВА) И О.Ф.Э. СИГНАЛА (СПРАВА),	140
РИСУНОК 6-5 – РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КАНАЛОВ ПО ВЕЛИЧИНЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ, 2014 ГОД	140
РИСУНОК 6-6 – РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО РАЗНОСТИ ЗАДЕРЖЕК МЕЖДУ СОСЕДНИМИ КАНАЛАМИ, ИЗМЕРЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ СВЕТОДИОДНОГО ИСТОЧНИКА DT_{LED} И С ПОМОЩЬЮ ПРОВЕРОЧНОГО ИМПУЛЬСА DT_{TST} ДЛЯ 48 ОМ ВАКАL-GVD	142
РИСУНОК 6-7 – ВРЕМЕННЫЕ ЗАДЕРЖКИ КАНАЛОВ, ИЗМЕРЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ ПРОВЕРОЧНОГО ИМПУЛЬСА, В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАПРЯЖЕНИЯ НА ДЕЛИТЕЛЕ ФЭУ ДЛЯ 72 ОПТИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ ВАКАL-GVD	142
РИСУНОК 6-8 – ПРИМЕРЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ (СИНИЙ ЦВЕТ) И МОДЕЛИРОВАННЫХ (КРАСНЫЙ ЦВЕТ) РАСПРЕДЕЛЕНИЙ МЕЖКАНАЛЬНЫХ ЗАДЕРЖЕК ДЛЯ МЮОННЫХ ДАННЫХ 2015 ГОДА (КАНАЛЫ 36/37 СЛЕВА И 54/55 СПРАВА)	144
РИСУНОК 6-9 – ВРЕМЕННЫЕ КАЛИБРОВОЧНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ T_{SHIFT} КАНАЛОВ КЛАСТЕРА ВАКАL- GVD	145
ТАБЛИЦА 1-1 – ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДЫ В МЕСТАХ РАЗМЕЩЕНИЯ НЕЙТРИННЫХ ТЕЛЕСКОПОВ.....	20
ТАБЛИЦА 1-2 – ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЭУ РАЗЛИЧНЫХ ПРОЕКТОВ НЕЙТРИННЫХ ТЕЛЕСКОПОВ	43
ТАБЛИЦА 3-1 – ХАРАКТЕРИСТИКИ БОРОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА VITROVEX	57
ТАБЛИЦА 3-2 – СПЕЦИФИКАЦИЯ РАЗЪЕМА SUBCONN LPBH5FSS	61
ТАБЛИЦА 3-3 – СПЕЦИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ РАЗЪЕМА SUBCONN LPBH5FSS	61
ТАБЛИЦА 3-4 – ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕЛЯ WACKER SILGEL® 612 A/B	63

ТАБЛИЦА 3-5 – СПЕЦИФИКАЦИЯ ФЭУ НАМАМАТСU R7081-100 [17].....	67
ТАБЛИЦА 3-6 – ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЭУ ПО ДАННЫМ ПРОИЗВОДИТЕЛЯ.....	69
ТАБЛИЦА 3-7 – СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСОВ ОМ.....	77
ТАБЛИЦА 3-8 – ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОМ ВАКАЛ-GVD.....	82
ТАБЛИЦА 4-1 – ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСЦИЛЛОГРАФА LESCROY NDO 4034.....	86
ТАБЛИЦА 4-2 – РЕЗУЛЬТАТЫ АППРОКСИМАЦИИ КРИВОЙ НАСЫЩЕНИЯ	111
ТАБЛИЦА 4-3 – СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ И РАЗБРОС ПАРАМЕТРОВ ПРОВЕРОЧНОГО ИМПУЛЬСА ДЛЯ 87 ОМ	118
ТАБЛИЦА 4-4 – ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОМ	123
ТАБЛИЦА 5-1 – РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ 3-Х ДЕЛИТЕЛЕЙ ФЭУ (ВОЛЬТЫ).....	128
ТАБЛИЦА 5-2 – РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ БЛОКОВ ЭЛЕКТРОНИКИ ОМ	128
ТАБЛИЦА 5-3 – РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЕРАТИВНОЙ ПРОВЕРКИ ОМ.....	133
ТАБЛИЦА 6-1 – УСРЕДНЕННЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ УСИЛЕНИЯ КАНАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПО ДАННЫМ 2014 ГОДА.....	141
ТАБЛИЦА 6-2 – СТАТИСТИКА ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ	145
ТАБЛИЦА 6-3 – ДАННЫЕ ПО РАБОТЕ ОМ В СОСТАВЕ УСТАНОВКИ	146

Список сокращений и условных обозначений

FPGA – field-programmable gate array

FWHM – full width at half maximum

MTBF – mean time between failures

SMA – Sub-Miniature version A

UML – Unified Modeling Language

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

м.ф.э. – многофотоэлектронный

о.ф.э. – однофотоэлектронный

ОМ – оптический модуль

ф.э. – фотоэлектрон

ФЭУ – фотоэлектронный умножитель

Список терминов

коаксиальный разъем SMA: миниатюрный, высокочастотный разъем для подключения коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 50 Ом.

отношение пик-долина: Отношение количество сигналов в пике о.ф.э. распределения к количеству сигналов в долине о.ф.э. распределения.

полная ширина на полувысоте (full width at half maximum): полная ширина, рассчитанная как разница между максимальным и минимальным значениями аргумента функции, взятыми на уровне равном половине её максимального значения.

программируемая пользователем вентиляционная матрица (field-programmable gate array): полупроводниковое устройство, которое может быть сконфигурировано производителем или разработчиком после изготовления.

седиментация (осаждение): оседание частиц дисперсной фазы в жидкости или газе под действием гравитационного поля или центробежных сил.

средняя наработка на отказ (mean time between failures): технический параметр, характеризующий надёжность восстанавливаемого прибора, устройства или технической системы. Средняя продолжительность работы устройства между отказами, то есть показывает, какая наработка в среднем приходится на один отказ. Выражается в часах.

триггер: иерархия последовательных решений о соответствии признаков события изучаемому явлению, сопровождаемых командой на регистрацию события. К числу признаков событий относятся, например, их топология, последовательность появления во времени и величины амплитуд импульсов от детекторов частиц, факт срабатывания определенных детекторов и т. п.

унифицированный язык моделирования (Unified Modeling Language): язык графического описания для объектного моделирования в области разработки программного обеспечения, моделирования бизнес-процессов, системного проектирования и отображения организационных структур.

фотоэлектронный умножитель: Электровакуумный прибор, в котором поток электронов, излучаемый фотокатодом под действием оптического излучения (фототок), усиливается в умножительной системе в результате вторичной электронной эмиссии; ток в цепи анода (коллектора вторичных электронов) значительно превышает первоначальный фототок (обычно в 10^5 раз и выше).

электроника предварительной обработки сигнала: регистрирующая электроника, аналоговая электроника предварительной обработки сигнала, интерфейс, front-end электроника, аналоговая электроника "переднего края".

Список литературы

1. Ahrens J. Sensitivity of the IceCube detector to astrophysical sources of high energy muon neutrinos / Ahrens J., Bahcall J., Bai X. и др. // *Astroparticle Physics* – 2004. – Т. 20 – № 5 – С.507–532.
2. Ahrens J. IceCube Preliminary Design Document / J. Ahrens, J. R. Alonso, J. N. Bahcall, X. Bai, T. Becka, K.-H. Becker, и др. – 2001.– 1-233с.
3. Material S.O. Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector / Material S.O., Web S., York N., и др. // *Science* – 2013. – Т. 342 – № 6161 – С.1242856–1242856.
4. E. Aslanides, J-J. Aubert S.B. et al. A Deep Sea Telescope for High Energy Neutrinos / E. Aslanides, J-J. Aubert S.B. и др. // *ANTARES collaboration* – 1999.
5. Ageron M. Conceptual Design Report for a Deep-Sea Research Infrastructure in the Mediterranean Sea Incorporating a Very Large Volume Neutrino Telescope / M. Ageron, J. A. Aguilar, S. Anvar, и др. – 2008.
6. Bagley P. Technical Design Report for a Deep-Sea Research Infrastructure in the Mediterranean Sea Incorporating a Very Large Volume Neutrino Telescope / P. Bagley, M. Ageron, и др. – 2009.
7. Belolaptikov I.A. The Baikal underwater neutrino telescope: Design, performance, and first results / Belolaptikov I.A., Bezrukov L.B., Borisovets B.A. и др. // *Astroparticle Physics* – 1997. – Т. 7 – № 3 – С.263–282.
8. Sokalski I. The Baikal Neutrino Telescope NT-200 / Sokalski I., Spiering C., (ed.) // *BAIKAL Note 92-03* – 1992. – Т. 3.
9. Aynutdinov V. The Baikal neutrino experiment: NT200+ and beyond / Aynutdinov V., Balkanov V., Belolaptikov I., и др. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* – 2007. – Т. 572 – № 1 – С.511–514.
10. Aynutdinov V. The Baikal neutrino experiment: Status, selected physics results, and perspectives / Aynutdinov V., Avrorin A., Balkanov V. и др. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* – 2008. – Т. 588 – № 1–2 – С.99–106.

11. Avrorin A. The Gigaton volume detector in lake Baikal / Avrorin A., Aynutdinov V., Belolaptikov I., и др. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 2011. – Т. 639 – № 1 – С.30–32.
12. Avrorin A.D. The prototyping/early construction phase of the BAIKAL-GVD project / Avrorin A.V, Avrorin A.D., Aynutdinov V.M. и др. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 2014. – Т. 742 – С.82–88.
13. Avrorin A.D. Status and recent results of the Baikal-GVD project / Avrorin A.V., Avrorin A.D., Aynutdinov V.M. и др. // Physics of Particles and Nuclei – 2015. – Т. 46 – С.211–221.
14. Avrorin A.D. Baikal-GVD results / Avrorin A.D., Avrorin A. V., Aynutdinov V.M., и др. // EPJ Web of Conferences – 2016. – Т. 116 – С.11005.
15. BAGDUEV R. High-sensitive fast optical sensor QUASAR-370 for large-scale experiments in cosmic-ray physics / BAGDUEV R., BEZRUKOV L., BORISOVETS B., и др. // IZVESTIYA AKADEMII NAUK SSSR SERIYA FIZICHESKAYA – 1993. – Т. 57 – № 4 – С.135–137.
16. Bagduev R.I. The optical module of the Baikal Deep Underwater Neutrino Telescope / Bagduev R.I., Balkanov V., Belolaptikov I.A., и др. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 1999. – Т. 420 – № 1–2 – С.138–154.
17. HAMAMATSU LARGE PHOTOCATHODE AREA PHOTOMULTIPLIER TUBES [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/LARGE_AREA_PMT_TPMH1286E.pdf.
18. Tamm I. Radiation emitted by uniformly moving electrons / Tamm I. // Journal of Physics of the USSR – 1939. – Т. 1 – № 5/6 – С.439–454.
19. Dzhilkibaev J.-A.M. Cherenkov detectors for high energy neutrino astrophysics / Dzhilkibaev J.-A.M., Domogatsky G. V., Suvorova O. V. // Phys. Usp. – 2015. – Т. 58 – С.495–502.
20. Belyaev A. Proc. of the 1978 DUMAND Summer Workshop / Ed. by A. Roberts. — La Jolla, Calif.: DUMAND, Scripps Institution of Oceanography / Belyaev A., Ivanenko I., Makarov V. и др. – 1979. – Т. 1 – С.337.
21. Bezrukov L.B. Simulation and Analysis Methods for Large Neutrino Telescope / Bezrukov L.B., Butkevich A. V. // Proc. of the Workshop DESY-PROC-1999-01, Ed. Ch Spiering, — Zeuthen: DESY – 1999. – С.265.

22. Джилкибаев Ж.-А. М. Поиск нейтрино сверхвысоких энергий и гипотетических частиц темной материи в экспериментах на Байкальском глубоководном нейтринном телескопе НТ-200: дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.16 / Джилкибаев Жан-Арыс Магисович. — М., 2005. — С.189.
23. Ackermann M. Optical properties of deep glacial ice at the South Pole / Ackermann M., Ahrens J., Bai X., Al. E. и др. // *Journal of geophysical research : JGR / D, Atmospheres* – 2006. – Т. 111 – № 13 – С.D13203, 26 S.
24. Abbasi R. The Design and Performance of IceCube DeepCore / Abbasi R., Abdou Y., Abu-Zayyad T., и др. // *Astroparticle Physics* – 2012. – Т. 35 – № 10 – С.615–624.
25. Ильичев В.И. Световой фон океана / Ильичев В.И., Кобылянский В.В., Мойсейченко В.В., и др. // Отв. редакторы В. И. Ильичев, А. А. Петрухин; АН СССР, Дальневост. отд-ние, Тихоокеан. океанол. ин-т, Моск. инж.-физ. ин-т – М. : Наука, – 1990. – С.115.
26. Alexander C.M. Optical Module for DUMAND II - Japanese Version / Alexander C.M., и др. // *Proceedings of the 23rd International Cosmic Ray Conference held 19-30 July at University of Calgary, Alberta, Canada* – 1993. – Т. 4 – С.546.
27. Научно-образовательный центр НЕВОД [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.nevod.mephi.ru/ru/> (дата доступа: 01.09.2016).
28. Хохлов С.С. Статус черенковского водного детектора невод / Хохлов С.С., Амельчаков М.Б., Ашихмин В.В. и др. // *Научная сессия МИФИ-2010. Т.4 Физика ядра и частиц. Астрофизика и космофизика. Квантовая электроника.* – 2010. – С.12–16.
29. Desiati P. Neutrino Astronomy at the South Pole: Status of the AMANDA Experiment / Desiati P., Collaboration for the A., Bland и др. – 2003.
30. AMANDA Collaboration A. The ICECUBE prototype string in AMANDA / AMANDA Collaboration A., Ackermann M. и др. // *Nucl.Instrum.Meth.* – 2006. – Т. A556 – С.169–181.
31. Wischnewski R.. The performance of the AMANDA-II 19 string array / Wischnewski R., и др. // *Proceedings of the 27th International Cosmic Ray Conference. 07-15 August. Hamburg, Germany. Under the auspices of the International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP).* – 2001. – Т. 3 – С.1105.
32. Andres E. The AMANDA Neutrino Telescope: Principle of Operation and First Results / Andres E. и др. // *Astropart.Phys.* – 2000. – Т. 13 – С.1–20.
33. Public Information on AMANDA-II [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.amanda.uci.edu/public_info.html (дата доступа: 01.09.2016).

34. Ribordy M. AMANDA: Status and latest Results / Ribordy M. и др. // 39th Rencontres de Moriond, Electroweak Interactions and Unified Theories – 2004.
35. IceCube - Detector [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://icecube.wisc.edu/science/icecube/detector> (дата доступа: 01.09.2016).
36. Abbasi R. The IceCube data acquisition system: Signal capture, digitization, and timestamping / Abbasi R., Ackermann M., Adams J. и др. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 2009. – Т. 601 – № 3 – С.294–316.
37. IceCube - Photos & Video [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://icecube.wisc.edu/gallery/press/view/1336> (дата доступа: 01.09.2016).
38. Abbasi R. Calibration and characterization of the IceCube photomultiplier tube / Abbasi R., Abdou Y., Abu-Zayyad T. и др. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 2010. – Т. 618 – № 1–3 – С.139–152.
39. Smirnov O.J. Precision measurements of time characteristics of ETL9351 photomultipliers / Smirnov O.J., Lombardi P., Ranucci G. и др. // Instruments and Experimental Techniques – 2004. – Т. 47 – № 1 – С.69–79.
40. Arnal F. Photomultiplier collection efficiencies and nonpoissonian pulse height distributions / Arnal F., Baldwin G.C., Becker A. и др. // Journal of Physics D: Applied Physics – 1973. – Т. 6 – № 2 – С.303.
41. Lubsandorzhev B.K. Studies of prepulses and late pulses in the 8" electron tubes series of photomultipliers / Lubsandorzhev B.K., Pokhil P.O., Vasiljev R. V., и др. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 2000. – Т. 442 – № 1–3 – С.452–458.
42. Coates P.B. The origins of afterpulses in photomultipliers / Coates P.B. // Journal of Physics D: Applied Physics – 1973. – Т. 6 – № 10 – С.301.
43. Anderson T. Generation-2 IceCube Digital Optical Module and DAQ / Anderson T., Hanson K., Kelley J.L. и др. // Proceedings of the 34th International Cosmic Ray Conference, The Hague, The Netherlands, 30 July - 6 August; Proceedings of Science – 2015. – Т. ICRC2015 – С.1148.
44. Classen L. Multi-PMT Optical Modules for IceCube-Gen2 / Classen L., A. K., и др. // Proceedings of the 34th International Cosmic Ray Conference, The Hague, The Netherlands, 30 July -

6 August; Proceedings of Science – 2015. – Т. ICRC2015 – С.1147.

45. Ishihara A. R&D for the Next Generation IceCube: IceCube-Gen2 [Электронный ресурс] // Neutrino Frontier Workshop Режим доступа: <http://hep-www.px.tsukuba.ac.jp/nfws2014/slides/Ishihara.pdf>.

46. SCHULTE L. A large-area single photon sensor employing wavelength-shifting and lightguiding technology / SCHULTE L., VOGEL M., HOFFMANN A. и др. // Proceedings of the 33RD INTERNATIONAL COSMIC RAY CONFERENCE, RIO DE JANEIRO – 2013.

47. Böser S. Wavelength-shifting Optical Module (WOM) / Böser S. // Proceedings of the MANTS — Meeting | Geneva | Sept. 22 nd – 2014.

48. ANTARES - overview [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://antares.in2p3.fr/Overview/index.html> (дата доступа: 01.09.2016).

49. ANTARES (telescope) [Электронный ресурс] Режим доступа: [https://en.wikipedia.org/wiki/ANTARES_\(telescope\)](https://en.wikipedia.org/wiki/ANTARES_(telescope)) (дата доступа: 01.09.2016).

50. Collaboration The ANTARES Optical Module / Collaboration // Nucl.Instrum.Meth. – 2002. – Т. A484 – С.369–383.

51. KM3Net [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.km3net.org/home.php> (дата доступа: 01.09.2016).

52. Kapustinsky S.J. A fast timing light pulser for scintillation detectors / Kapustinsky S.J., DeVries M.R., DiGiacomo J.N., и др. // Nucl Instrum Meth – 1985. – Т. A241 – С.612–613.

53. Resvanis L.K. NESTOR first results / Resvanis L.K. // Nuclear Physics B - Proceedings Supplements – 2005. – Т. 138 – С.187–190.

54. Anassontzis E.G. The optical module for the NESTOR neutrino telescope / Anassontzis E.G., Ioannou P., Katsanevas S. и др. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 2002. – Т. 479 – № 2–3 – С.439–455.

55. Hanada H. A highly sensitive optical detector for use in deep underwater / Hanada H., Hayashino T., Ito M. и др. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 1998. – Т. 408 – № 2–3 – С.425–437.

56. Sotiriou S. Mu-metal mesh for the Optical Module of the underwater neutrino telescope NESTOR / Sotiriou S., и др. // Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) – 1998. – Т. 61 – С.159–163.

57. Matsuno S. Single photon light detector for deep ocean applications / Matsuno S., Babson J., Learned J.G. и др. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 1989. – Т. 276 – № 1–2 – С.359–366.
58. Capone A. report / Capone A., for NESTOR Collaboration // Proc. of the 25th ICRC. Durban, South Africa – 1997. – Т. 7 – С.49.
59. Trassati L. . / Trassati L., et al. и др. // NESTOR internal Report, NESTOR-LNF/2 – 1996.
60. Nicolau C.A. From NEMO to KM3NeT-Italy / Nicolau C.A.// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 2014. – Т. 742 – С.203–207.
61. Leonora E. Design and assembly of the optical modules for phase-2 of the NEMO project / Leonora E., Aiello S. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 2013. – Т. 725 – С.234–236.
62. Кузьмичев Л. А. Глубоководный нейтринный телескоп НТ-200: Первые результаты: дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.23 / Кузьмичев Леонид Александрович. — М., 2002. – С.245.
63. Буднев Н. М. Глубоководный нейтринный телескоп НТ-200 и исследования озера Байкал как места создания больших глубоководных черенковских детекторов: дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.23 / Буднев Николай Михайлович. — М., 1999. – С.221.
64. Margiotta A. The KM3NeT deep-sea neutrino telescope / Margiotta A. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 2014. – Т. 766 – С.83–87.
65. Giordano V. Study on 3-inch Photomultipliers / Giordano V., Aiello S., Leonora E., и др. // Proceedings of the RICAP-14, Noto (Sicily, Italy) September 30th- October 3rd – 2014.
66. Emanuele LEONORA The optical modules for the 8 towers of the KM3NeT-Italia project / Emanuele LEONORA, и др. // Proceedings of the RICAP-14, Noto (Sicily, Italy) September 30th- October 3rd – 2014.
67. White Rabbit [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.ohwr.org/projects/white-rabbit> (дата доступа: 09.09.2016).
68. Leonora E. Noise Pulses in Large Area Optical Modules / Leonora E., Aiello S., Giordano V. и др. // IEEE Transactions on Nuclear Science – 2014. – Т. 61 – № 4 – С.2097–2104.
69. Avgitas T. Characterization of Hamamatsu R12199-02 PMTs for the KM3NeT / Avgitas

T., Bourlis G., Leisos A. и др. // Proceedings of the HEP2013, Recent Developments in High Energy Physics and Cosmology, Chios, Greece, 25-28 April – 2013.

70. Aynutdinov V. The prototype string for the km³-scale Baikal neutrino telescope / Aynutdinov V., Avrorin A., Balkanov V. и др. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 2009. – Т. 602 – № 1 – С.227–234.

71. Avrorin A. The Baikal neutrino experiment / Avrorin A., Aynutdinov V., Balkanov V. и др. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 2011. – Т. 626 – С.13–18.

72. Aynutdinov V. The Baikal Neutrino Project: Present and perspective / Aynutdinov V., Avrorin A., Balkanov V. и др. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 2011. – Т. 628 – № 1 – С.115–119.

73. Avrorin A.V. Status of the BAIKAL neutrino experiment / Avrorin A.V., Aynutdinov V.M., Balkanov V.A. и др. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics – 2011. – Т. 75 – № 3 – С.414–415.

74. Avrorin A.V. Status of the Baikal-GVD project / Avrorin A.V., Aynutdinov V.M., Bannasch R. и др. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 2012. – Т. 692 – С.46–52.

75. Avrorin A.V. Current status of the BAIKAL-GVD project / Avrorin A.V., Aynutdinov V.M., Belolapnikov I.A. и др. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 2013. – Т. 725 – С.23–26.

76. Avrorin A.V. Status of the Baikal-GVD Project / Avrorin A.D., Avrorin A.V., Aynutdinov V. и др. // Proceedings, 16th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics: Particle Physics at the Year of Centenary of Bruno Pontecorvo – 2015. – 99–101с.

77. Avrorin A.D. Status of the early construction phase of Baikal-GVD / Avrorin A.D., Avrorin A.V., Aynutdinov V. и др. // Nuclear and Particle Physics Proceedings – 2016. – Т. 273 – С.314–320.

78. АВРОРИН А.В. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ГИРЛЯНДА БАЙКАЛЬСКОГО НЕЙТРИННОГО ТЕЛЕСКОПА НТ1000 / АВРОРИН А.В., АЙНУТДИНОВ В.М., БЕЛОЛАПТИКОВ И.А. и др. // Приборы и техника эксперимента – 2011. – № 5 – С.55–65.

79. Avrorin A.D. The data acquisition system for Baikal-GVD / Avrorin A.D., Aynutdinov

V.M., Bannash R. и др. // EPJ Web of Conferences – 2016. – Т. 116 – С.5004.

80. Avrorin A.V. Data Acquisition System of the NT1000 Baikal Neutrino Telescope / Avrorin A.V., Avrorin A.D., Aynutdinov V.M. и др. // Instruments and Experimental Techniques – 2014. – Т. 57 – № 3 – С.262–273.

81. Aynutdinov V. Baikal neutrino telescope - An underwater laboratory for astroparticle physics and environmental studies / Aynutdinov V., Avrorin A., Balkanov V. и др. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 2009. – Т. 598 – № 1 – С.282–288.

82. АВРОРИН А.В. СТАТУС БАЙКАЛЬСКОГО НЕЙТРИННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА / АВРОРИН А.В., АЙНУТДИНОВ В.М., БАЛКАНОВ В.А. и др. // ИЗВЕСТИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ – 2011. – Т. 75 – № 3 – С.443–444.

83. КОШЕЧКИН А.П. СТАТУС БАЙКАЛЬСКОГО НЕЙТРИННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА / КОШЕЧКИН А.П., КЛАБУКОВ А.М., КЛИМОВ А.И. и др. // Известия Российской академии наук. Серия физическая – 2009. – Т. 73 – № 5.

84. Avrorin A.D. The optical module of Baikal-GVD / Avrorin A.D., Avrorin A.V., Aynutdinov V.M. и др. // EPJ Web of Conferences – 2016. – Т. 116 – С.1003.

85. Аврорин А.В. Оптический модуль Глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD / Аврорин А.В., Аврорин А.Д., Айнутдинов В.М. и др. // Письма в журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра» – 2016. – Т. 13 – № 6 – С.756–766.

86. Ma K.J. Time and amplitude of afterpulse measured with a large size photomultiplier tube / Ma K.J., Kang W.G., Ahn J.K. и др. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 2011. – Т. 629 – № 1 – С.93–100.

87. Avrorin A.D. Status and perspectives of the BAIKAL-GVD project / Avrorin A.D., Avrorin A.V., Aynutdinov V.M. и др. // EPJ Web of Conferences – 2016. – Т. 121 – С.5003.

88. Avrorin A.D. LED based calibration systems of the Baikal-GVD neutrino telescope / Avrorin A.D., Avrorin A.V., Aynutdinov V.M. и др. // EPJ Web of Conferences – 2016. – Т. 116 – С.6005.

89. Avrorin A.D. The optical detection unit for Baikal-GVD neutrino telescope / Avrorin A.D., Avrorin A.V., Aynutdinov V.M. и др. // EPJ Web of Conferences – 2016. – Т. 121 – С.5008.