

## ОПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ ГЛУБОКОВОДНОГО НЕЙТРИННОГО ТЕЛЕСКОПА ВАИКАЛ-GVD

*А. В. Аврорин<sup>а</sup>, А. Д. Аврорин<sup>а</sup>, В. М. Айнутдинов<sup>а</sup>, Р. Баннаш<sup>б</sup>,  
И. А. Белолоптиков<sup>в</sup>, Д. Ю. Богородский<sup>г</sup>, В. Б. Бруданин<sup>в</sup>, Н. М. Буднев<sup>г</sup>,  
О. Н. Гапоненко<sup>а</sup>, А. Р. Гафаров<sup>г</sup>, К. В. Голубков<sup>а</sup>, З. Гонс<sup>в</sup>, Т. И. Гресс<sup>г</sup>,  
И. А. Данильченко<sup>а</sup>, Ж.-А. М. Джилкибаев<sup>а</sup>, Г. В. Домогацкий<sup>а</sup>,  
А. А. Дорошенко<sup>а</sup>, А. Н. Дьячок<sup>г</sup>, **В. А. Жуков<sup>а</sup>**, А. В. Загородников<sup>г</sup>,  
В. Л. Зурбанов<sup>г</sup>, К. Г. Кебкал<sup>б</sup>, О. Г. Кебкал<sup>б</sup>, В. А. Кожин<sup>д</sup>,  
К. В. Конищев<sup>в</sup>, А. В. Коробченко<sup>в</sup>, Ф. К. Кошель<sup>а</sup>, А. П. Кошечкин<sup>а</sup>,  
В. Ф. Кулепов<sup>е</sup>, Д. А. Кулешов<sup>а</sup>, В. И. Ляшук<sup>а</sup>, М. Б. Миленин<sup>е</sup>,  
Р. Р. Миргазов<sup>г</sup>, Э. А. Осипова<sup>д</sup>, А. И. Панфилов<sup>а</sup>, Л. В. Паньков<sup>г</sup>,  
Е. Н. Плисковский<sup>в</sup>, М. И. Розанов<sup>ж</sup>, Е. В. Рябов<sup>г</sup>, А. В. Скурихин<sup>д</sup>,  
А. А. Смагина<sup>в</sup>, О. В. Суворова<sup>а</sup>, В. А. Таболенко<sup>г</sup>, Б. А. Таращанский<sup>г</sup>,  
С. В. Фиалковский<sup>е</sup>, Б. А. Шайбонов<sup>в</sup>, А. А. Шейфлер<sup>а,1</sup>,  
М. Д. Шелепов<sup>а</sup>, С. А. Яковлев<sup>б</sup>*

<sup>а</sup> Институт ядерных исследований РАН, Москва

<sup>б</sup> EvoLogics GmbH, Берлин

<sup>в</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>г</sup> Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

<sup>д</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына  
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

<sup>е</sup> Нижегородский государственный технический университет, Нижний Новгород, Россия

<sup>ж</sup> Государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

В апреле 2015 г. в оз. Байкал был установлен и включен в режим постоянной экспозиции первый кластер глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD, состоящий из восьми гирлянд, каждая из которых оснащена 24 оптическими модулями (ОМ). Оптический модуль — регистрирующий элемент Baikal-GVD, содержащий фотоэлектронный умножитель с высокой квантовой чувствительностью Hamamatsu R7081-100. В данной статье представлены конструкция оптического модуля, принцип работы электроники ОМ и результаты исследований основных характеристик ОМ.

In April 2015 the first cluster of Baikal-GVD was deployed in Lake Baikal and put into operation. It comprises a total of eight strings. Each string consists of 24 optical modules. An optical module is detection element Baikal-GVD, comprising a photomultiplier tube with a high quantum sensitivity Hamamatsu R7081-100. We describe the design of the optical module, the front-end electronics and the laboratory characterization and calibration.

PACS 95.55.Vj; 29.40.Ka

<sup>1</sup>E-mail: a.a.sheffler@gmail.com

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в оз. Байкал на основе опыта многолетней эксплуатации детектора NT200 [1, 2] создается нейтринный телескоп нового поколения Baikal-GVD с эффективным объемом порядка кубического километра [3–9]. 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.

Оптический модуль (ОМ) — основной элемент регистрирующей системы телескопа. Фотодетектором ОМ является фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) R7081-100 фирмы Hamamatsu, который вместе с электроникой ОМ помещен в стеклянном корпусе, выдерживающем высокое давление воды. ФЭУ регистрируют излучение Вавилова–Черенкова, генерируемое заряженными частицами в воде. На основании информации (времени регистрации фотонов и количества фотоэлектронов (ф. э.)), полученной от группы оптических модулей, восстанавливается тип события (одиночный мюон, группа мюонов, каскадный ливень), направление трека и энергия взаимодействия.

Гирлянды объединяются в кластеры. Каждый кластер телескопа является функционально законченным детектором, способным работать как в составе единой установки, так и в автономном режиме. В апреле 2015 г. первый кластер Baikal-GVD «Дубна» был установлен в оз. Байкал и включен в режиме постоянной экспозиции. Конфигурация кластера представлена на рис. 1. Кластер состоит из восьми гирлянд по 24 ОМ каждая, расположенных на расстоянии 40 м друг от друга.

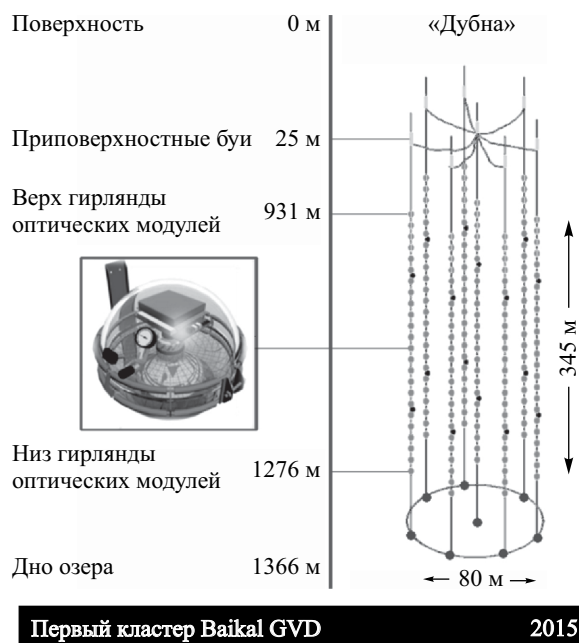


Рис. 1. Базовая конфигурация кластера Baikal-GVD

В статье представлено описание оптического модуля: конструкция, принцип работы и результаты исследований его характеристик.

### ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ BAIKAL-GVD

Основной структурной единицей системы сбора данных Baikal-GVD является секция ОМ [10–12]. Она представляет собой функционально законченный узел детектора, включающий в себя системы регистрации излучения, обработки сигналов, калибровки, формирования триггера и передачи 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. Базовая конфигурация секции (рис. 2) является в настоящее время основой для создания установки. Секция состоит из 12 ОМ, расположенных с шагом 15 м вдоль гирлянды, и центрального модуля секции. Аналоговые сигналы с ОМ передаются в центральный модуль по коаксиальным кабелям одинаковой длины 90 м. Каждая гирлянда включает в свой состав две секции ОМ и четыре акустических модема гидроакустической системы позиционирования [13]. Каналы синхронизации, электропитания и передачи данных секций объединяются в коммутационном модуле гирлянды и связаны кабельной линией длиной ~ 1200 м с центром управления кластера.

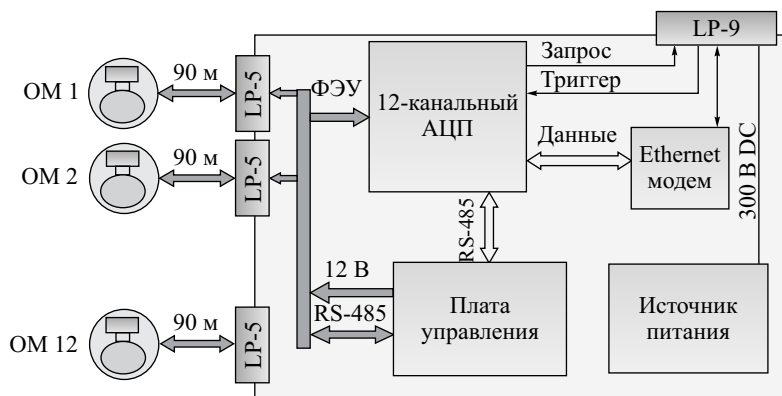


Рис. 2. Блок-схема секции Baikal-GVD

Представленный подход к построению системы сбора данных Baikal-GVD определяет состав электронных компонентов ОМ, их функциональность и ряд конструктивных особенностей глубоководных модулей установки.

### КОНСТРУКЦИЯ И УГЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОМ

Первые оптические модули для глубоководных нейтринных телескопов были разработаны в проекте DUMAND [14]. Данный подход получил развитие в проектах IceCube [15, 16], ANTARES [17], KM3NeT [18]. Общий вид оптического модуля телескопа Baikal-GVD представлен на рис. 3. Фотоэлектронный умножитель с полусферическим фотокатодом размещается в сферическом стеклянном глубоководном корпусе VITROVEX производства фирмы Nautilus Marine Service GmbH (Германия) из боросили-



Рис. 3. Оптический модуль

катного стекла диаметром 42 см. Оптический контакт между фотокатодом и стеклянным корпусом обеспечивается при помощи прозрачного (показатель преломления 1,404) силиконового двухкомпонентного геля SilGel 612A/B фирмы Wacker-Chemie GmbH (Германия), который надежно фиксирует ФЭУ в глубоководном корпусе и обеспечивает необходимую эластичность. Для уменьшения влияния магнитного поля Земли на работу фотоэлектронного умножителя ФЭУ защищен экраном (сеткой) из отожженного пермаллоя, уменьшающим влияние магнитного поля Земли на величину сигнала ФЭУ при его повороте с  $\sim 20$  до 5–8% (в зависимости от места засветки фотокатода: центр или периферийная часть).

На корпус ОМ устанавливается глубоководный разъем и вакуумный порт, через который производится откачка воздуха из ОМ до давления  $\sim 0,7$  атм, достаточного для надежной фиксации двух полусфер глубоководного корпуса между собой. Блочный пятиштырьковый низкопрофильный глубоководный разъем-розетка из нержавеющей стали в неопределённом корпусе SubConn LPBH5FSS предназначен для передачи аналогового сигнала от фотоэлектронного умножителя, управления работой и снабжения электропитанием ОМ. Блок электроники оптического модуля монтируется непосредственно на цоколе ФЭУ. Крепление ОМ на гирлянде осуществляется при помощи специальной рамы (см. рис. 3).

В качестве фотодетектора ОМ используется 10-диодный ФЭУ Hamamatsu R7081-100 (Япония) с полусферическим фотокатодом диаметром 25 см. Основные характеристики ФЭУ представлены в табл. 1.

Форма фотокатода ФЭУ и конструкция ОМ определяют угловую зависимость отклика ОМ на излучение. Информация о зависимости отклика ОМ от угла падения света на фотокатод ФЭУ используется при моделировании отклика установки. Для измерения этой характеристики использовался автоматизированный стенд, обеспечивающий поворот ОМ на заданный угол при помощи шагового двигателя. Стенд располагался в светоизолированном 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 ч. Фотокатод ФЭУ засвечивался плоскопараллель-

Таблица 1. Спецификация ФЭУ Hamamatsu R7081-100

Характеристика	Значение
Область спектральной чувствительности, нм	300–650
Квантовая эффективность фотокатода (в максимуме), %	35
Максимальное напряжение, обеспечивающее усиление $10^7$ , В	2000
Уровень собственных шумов (на 25 °С), Гц	8000
Разброс времен пролета фотоэлектронов в камере ФЭУ (FWHM), нс	3,4
Отношение пик–долина	2,8
Область линейности (при 2%-м отклонении), мА	40

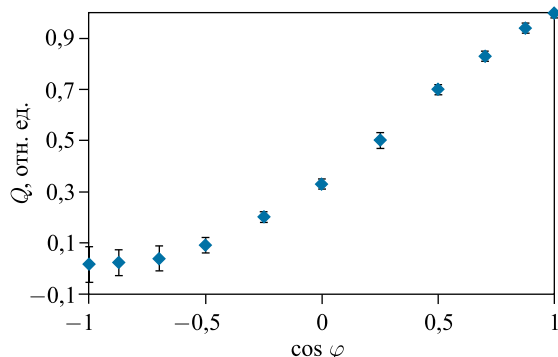


Рис. 4. Зависимость отклика OM от угла падения света на фотокатод  $\varphi$

ным потоком света от изотропного источника на основе синего светодиода Kingbright L7113 (длина волны 470 нм), размещаемого на расстоянии 3 м от исследуемого модуля, работающего в импульсном режиме (длительность импульса  $\sim 5$  нс). Измерялся заряд импульсов ФЭУ, инициированных вспышками светодиода. Для оценки систематической погрешности, которая может быть связана с нестабильностью интенсивности свечения светодиода, измерения проводились для трех последовательных полных поворотов OM относительно источника света и контролировалась повторяемость результатов измерений. Зависимость отклика OM от угла падения света на фотокатод представлена на рис. 4. Для максимальных углов поворота OM (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).

### ПРИНЦИП РАБОТЫ OM

В состав электроники OM входят источник высоковольтного напряжения, делитель напряжения, усилитель сигналов ФЭУ, модуль управления (контроллер OM) и светодиодная калибровочная система. Внешний вид и блок-схема блока электроники OM представлены на рис. 5 и 6 соответственно.

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  $\sim 20$  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  $\sim 1$  мВ. Это обеспечивает точность

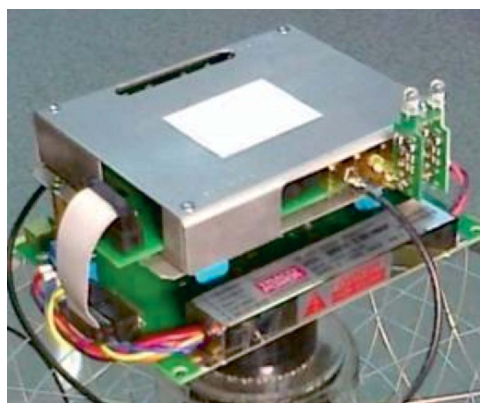


Рис. 5. Блок электроники OM, установленный на цоколе ФЭУ

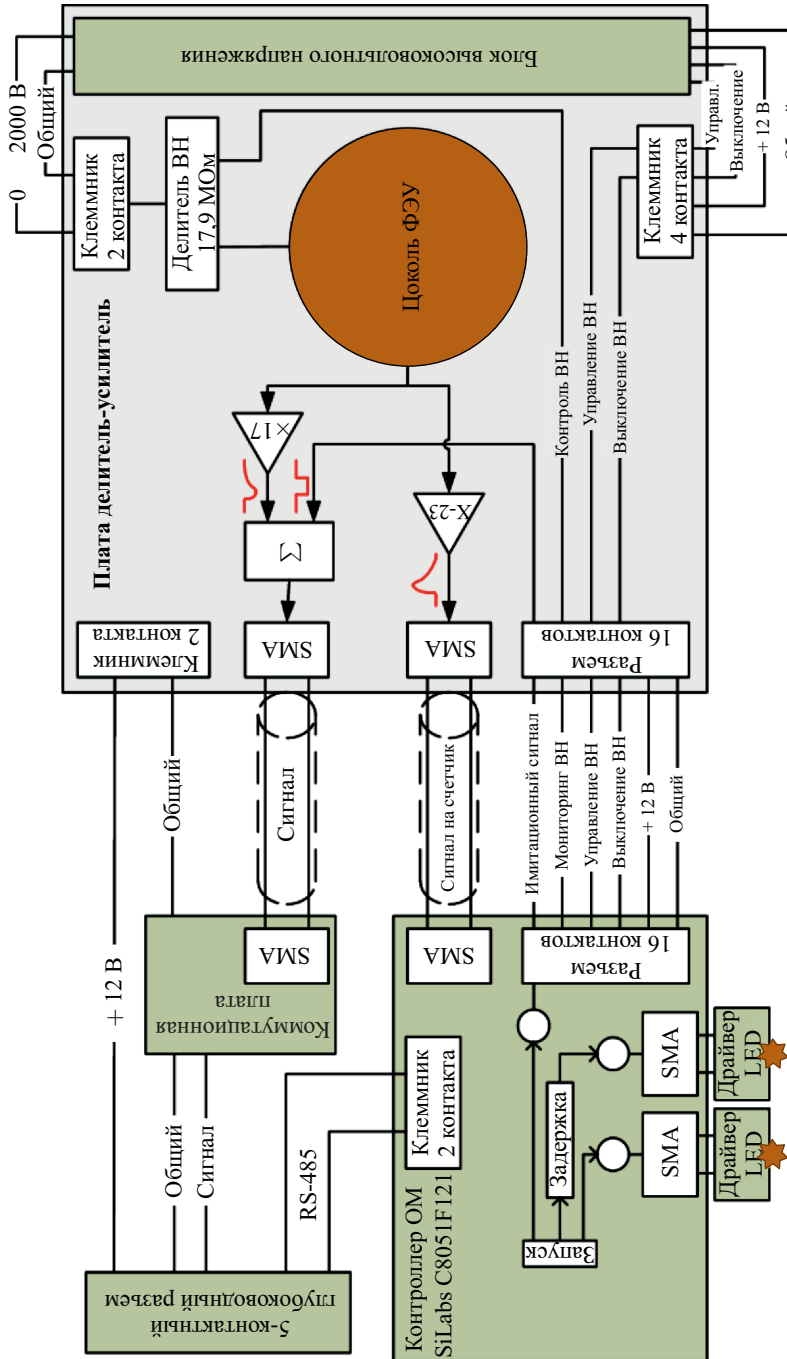


Рис. 6. Блок-схема электроники OM

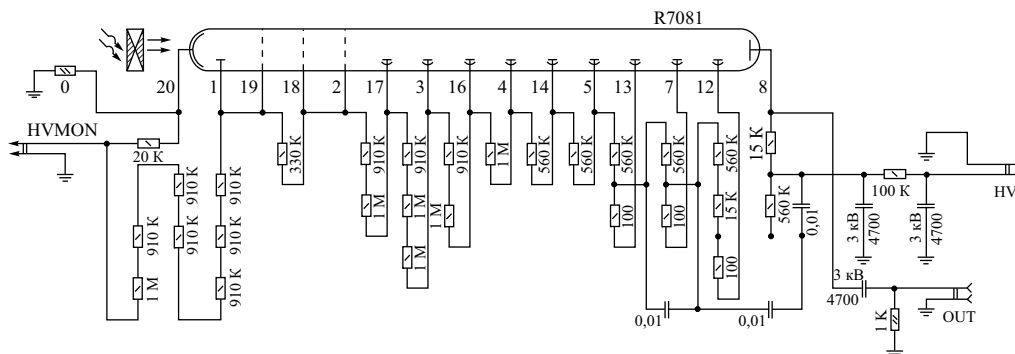


Рис. 7. Схема делителя напряжения ФЭУ Hamamatsu R7081-100

подбора рабочего напряжения ФЭУ не хуже 1 В. Результаты натурных испытаний показали высокую надежность данных блоков. Межиодные напряжения ФЭУ выбирались в соответствии с рекомендациями производителя. Полное сопротивление делителя составляет 18 МОм. Схема делителя напряжения представлена на рис. 7.

Путем подбора напряжения на делителе коэффициент усиления ФЭУ устанавливается на уровне  $10^7$ . Для достижения требуемой величины однофотозлектронного сигнала производится дополнительное усиление сигнала ФЭУ. Усилитель монтируется на одной плате с делителем напряжения ФЭУ и имеет два канала. Первый канал используется для измерений и усиливает однофотозлектронные сигналы в  $\sim 14$  раз до уровня  $\sim 25$  мВ. Второй канал усиливает в  $\sim 1$  раз сигналы ФЭУ, поступающие на счетчик шумовых импульсов контроллера ОМ, чтобы обеспечить постоянный контроль уровня загрузки измерительного канала, определяющий темп выработки триггера установки, максимальное значение которого ограничено пропускной способностью системы сбора и передачи данных. Локальные вариации интенсивности свечения байкальской воды могут приводить к увеличению темпа счета отдельных каналов в 5–10 раз. Мониторинг темпа счета каналов позволяет оперативно корректировать параметры триггерной системы (кратность совпадений и пороги регистрации каналов) вплоть до исключения канала из процедуры формирования триггера.

Для временной и амплитудной калибровки измерительного канала в ОМ предусмотрены два синих светодиода Kingbright L7113. Длина волны на максимуме излучения светодиодов составляет 470 нм, длительность импульса  $\sim 5$  нс. Возможность независимого регулирования интенсивности светодиодов и достаточно низкие перекрестные наводки между светодиодными каналами ( $< 1\%$ ) позволяют производить проверку линейности измерительного канала. Следует отметить, что используемая методика проверки линейности канала не требует использования источников света с линейными характеристиками. Для проверки линейности используется параметр  $Q(L1 + L2)/(Q(L1) + Q(L2))$ , где  $Q$  — заряды сигнала, измеренные при подсветке ФЭУ поочередно первым, вторым и одновременно двумя светодиодами ОМ. Такой подход существенно упрощает электронику ОМ и позволяет осуществлять контроль линейности каналов при работе ОМ в составе телескопа.

Система управления оптическими модулями разработана на основе микроконтроллера SiLabs C8051F121 фирмой ООО «СНИИП-Аунис» (Россия). С его помощью осуществля-

ется управление напряжением на ФЭУ, частотой и интенсивностью свечения светодиодов системы калибровки, а также мониторинг в реальном времени шумов ФЭУ и других параметров электроники. Управление контроллером ОМ осуществляется по линии связи (линии управления), организованной на базе интерфейса RS-485.

Важной составной частью измерительного канала ОМ является 90-м гибридный глубоководный кабель КСТ (РК50+9×0.15) производства фирмы ООО «Псковгеокабель» (Россия), соединяющий ОМ и центральный модуль секции. В состав кабеля входит коаксиальный проводник РК50 и девять жил для электропитания и управления работой ОМ.

Форма выходного сигнала ОМ определяется параметрами ФЭУ, усилителя и коаксиального кабеля. На рис. 8 представлены типичные формы импульсов, поступающих от ОМ, соответствующих сигналам в  $\sim 1$ ,  $\sim 22$ ,  $\sim 48$  и  $\sim 1140$  ф. э. Средние значения параметров импульсов для этого ОМ представлены в табл. 2. В линейной области форма

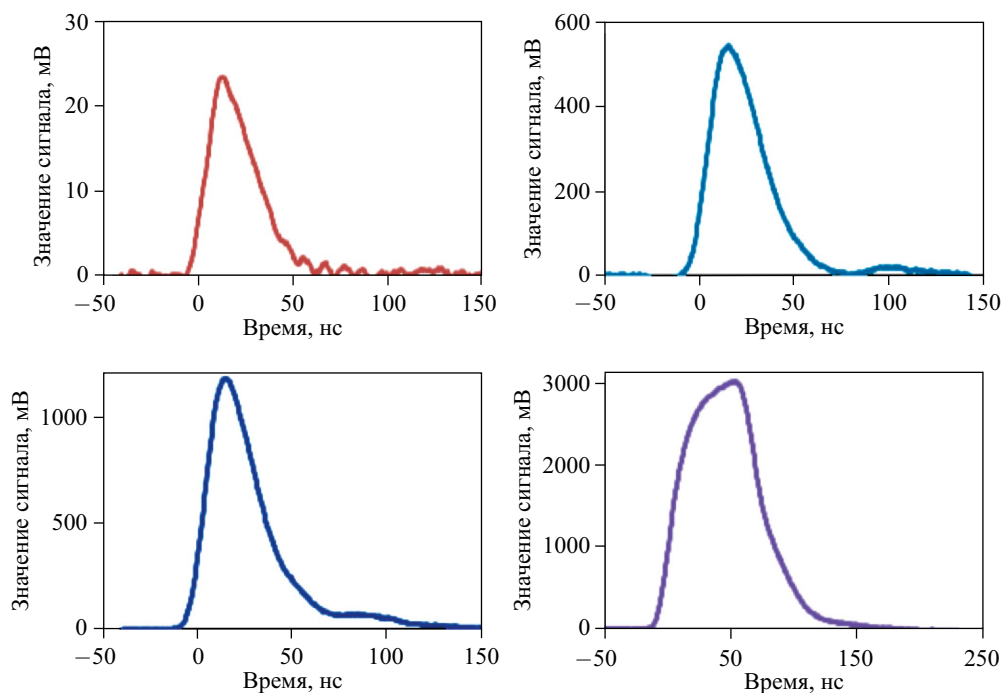


Рис. 8. Формы импульсов ОМ для сигналов, соответствующих  $\sim 1$ ,  $\sim 22$ ,  $\sim 48$  и  $\sim 1140$  ф. э.

Таблица 2. Средние значения параметров импульсов для одного ОМ

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



импульса ОМ определяется в основном прохождением через длинный коаксиальный кабель, который также играет роль естественного фильтра, увеличивающего длительность сигналов ФЭУ (FWHM) с  $\sim 10$  до  $\sim 30$  нс. Такая ширина сигнала оптимальна для его последующей оцифровки при помощи АЦП с частотой дискретизации 200 МГц ( $\sim 10$  точек на импульс). В нелинейной области работы измерительного канала  $> 10^2$  ф.э. искаженные формы сигнала связано с насыщением анодного тока ФЭУ и ограничением усилителя амплитуды сигналов на уровне 3 В.

Ослабление сигналов ФЭУ в кабеле составляет  $\sim 30\%$ . При коэффициенте усиления диодной системы ФЭУ  $\sim 10^7$  и усилителя  $\sim 14$  коэффициент усиления измерительного канала оптического модуля с учетом ослабления сигналов в кабеле составляет  $10^8$ .

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОМ

До монтажа ОМ в оз. Байкал был предусмотрен ряд проверочных процедур, обеспечивающих их надежное, долговременное функционирование в составе нейтринного телескопа: проверка функциональности отдельных элементов ОМ, проверка электроники при повышенной температуре, комплексная проверка ОМ во всех режимах работы. Проверка и калибровка ОМ выполнялась на стенде, созданном на базе цифрового четырехканального осциллографа LeCroy HDO4034 (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 четырех ОМ одновременно, и подключались ко входам осциллографа 90-м глубоководными кабелями, используемыми в телескопе. Калибровочными источниками света являлись светодиоды, установленные в ОМ. Работа стенда полностью автоматизирована. Программное обеспечение подготовлено на базе операционной системы семейства Windows.

На первом этапе проведения проверочных процедур осуществлялся выбор напряжения на делителе ФЭУ, обеспечивающего усиление измерительного канала ОМ (в дальнейшем — канала)  $\sim 10^8$ . Как указывалось выше, это соответствует коэффициенту усиления диодной системы ФЭУ  $\sim 10^7$ . Усиление каналов определялось на основании измерений однофотонных (о. ф. э.) зарядовых распределений ФЭУ, измеряемых в режиме о. ф. э.-подсветки светодиодом (вероятность регистрации сигнала составляла  $\sim 10\%$  при пороге регистрации 0,2 амплитуды импульса). Измерения проводились в режиме запуска осциллографа от генератора импульсов светодиодов контроллера ОМ. Оценки величины пьедестала и вклада шумов канала выполнялись при выключенных светодиодах также в режиме запуска от генератора импульсов.

Характерный о. ф. э.-спектр и распределение ОМ по величине о. ф. э.-разрешения представлены на рис. 9. На о. ф. э.-спектре первый пик соответствует распределению величины пьедестала, измеренного при выключенном светодиоде, а второй пик соответствует распределению одноэлектронных импульсов ФЭУ, выделенных при регистрации всплеск, генерируемых светодиодом. Однофотонное разрешение определялось как отношение стандартного отклонения распределения к среднему значению. Следует отметить, что при выбранном режиме измерений вклад многофотонных импульсов превышает оценку о. ф. э.-разрешения на величину  $\sim 20\%$ .

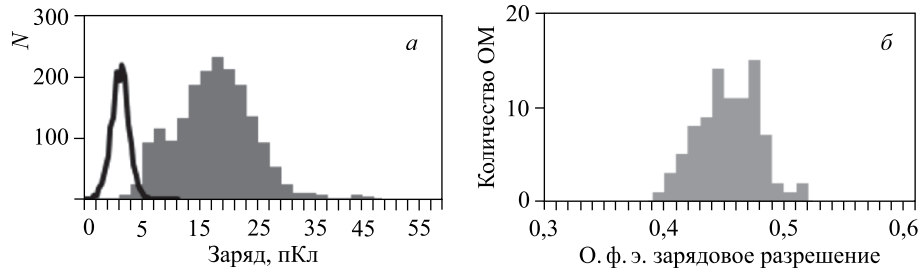


Рис. 9. Характерное о. ф. э. зарядовое распределение при коэффициенте усиления ФЭУ  $\sim 1 \cdot 10^7$  и распределение пьедестала (а), распределение ОМ по величине о. ф. э.-разрешения (б)

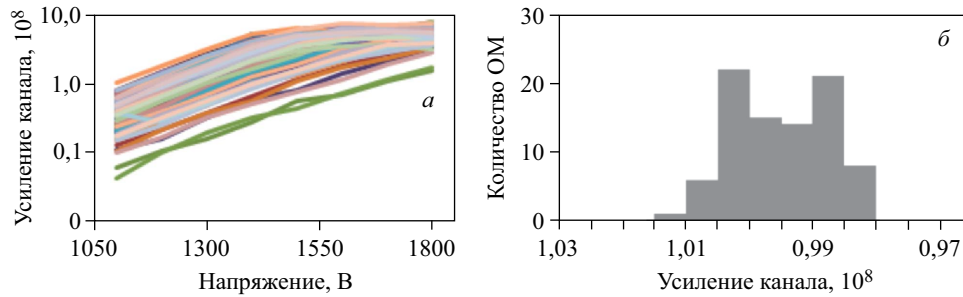


Рис. 10. Зависимость коэффициентов усиления каналов от величины напряжения на ФЭУ для 87 ОМ (а) и распределение каналов по подобранному коэффициенту усиления (б)

На рис. 10 представлены зависимости коэффициентов усиления каналов от напряжения на делителе ФЭУ и распределение каналов по подобранному коэффициенту усиления. Усиление каналов на уровне  $\sim 10^8$  достигается при величине напряжения в диапазоне от 1150 до 1750 В для исследованной партии ФЭУ.

Временное разрешение ОМ измерялось также в о. ф. э.-режиме и определялось как стандартное отклонение распределения времен регистрации о. ф. э.-сигналов (при регистрации сигналов использовался скользящий порог, равный половине амплитуды импульса). Типичный временной спектр для одного ОМ (рис. а) и распределение ОМ по величине временного разрешения (рис. б) представлены на рис. 11.

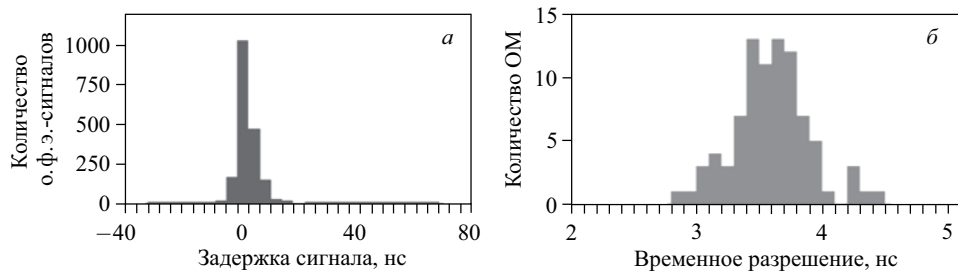


Рис. 11. Типичный временной спектр для одного ОМ (а) и распределение ОМ по величине временного разрешения (б)

Важной характеристикой канала является его диапазон линейности. Можно выделить два основных источника нелинейности каналов: ограничение максимальной амплитуды сигнала усилителем канала и насыщение ФЭУ, приводящее к изменению формы сигнала на выходе фотоэлектронного умножителя. Для исследования вида функции нелинейности каналов ФЭУ засвечивались вспышками светодиодов различной яркости. В качестве параметра, определяющего степень нелинейности канала, использовалась переменная  $S = Q / (N_{\text{фэ}} \times Q_{\text{фэ}})$ , где  $Q$  — измеренный заряд импульса,  $Q_{\text{фэ}}$  — заряд о. ф. э.-импульса,  $N_{\text{фэ}}$  — количество ф. э., формирующих импульс. Для оценки количества ф. э. использовалась информация о величине о. ф. э.-заряда и методика подсветки ФЭУ двумя независимыми источниками, способными засвечивать фотокатод как по отдельности, так

и одновременно. Последовательное удвоение интенсивности световых вспышек позволяет экстраполировать измерения коэффициента преобразования канала в нелинейную область его работы. Для этого используется итерационный метод подбора интенсивности световых вспышек каждого светодиода под величину измеренного отклика канала, полученного в условиях совместного включения светодиодов. Так, сложение световых сигналов от двух светодиодов при различных комбинациях яркости их вспышек позволяет формировать импульсы с заданным количеством ф. э.

Зависимость  $S$  от количества ф. э. (кривые насыщения) представлены на рис. 12 для 87 ОМ. Область линейности составляет величину  $\sim 10^2$  ф. э. Сплошная линия на рисунке представляет собой результат аппроксимации кривых насыщения всех исследованных ОМ функцией  $y = 1 / (1 + D)$ , где  $D = (\log N_{\text{фэ}} / x_0)^p$ ,  $x_0 = 2,68$ ,  $p = 8,67$ . Использование результатов аппроксимации кривых нелинейности индивидуальных каналов ( $x_0$  и  $p$  подбираются для каждого канала индивидуально) позволяет оценивать количество ф. э. в импульсе по измеренному заряду с точностью не хуже 10% в области до  $\sim 10^3$  ф. э.

Эффект насыщения ФЭУ не только ограничивает диапазон линейности каналов, но и оказывает влияние на точность измерения времени регистрации импульсов с большой амплитудой. Время регистрации импульса фиксируется в тот момент, когда величина сигнала достигает половины его максимального значения. В нелинейной области работы канала время регистрации импульса на половине его высоты начинает зависеть от амплитуды сигнала. Вреямплитудная зависимость характеризуется параметром  $\Delta t$  — отклонением времени регистрации от номинального значения. Характерная зависимость параметра  $\Delta t$  от количества ф. э., формирующих импульс, представлена на рис. 13, а. В диапазоне линейности канала величина  $\Delta t$  не превышает 1 нс. Распределение ОМ по граничному значению количества ф. э., для которого  $\Delta t < 1$  нс, представлено в правой части на рис. 13, б.

В качестве одного из основных триггерных условий, по которым на аппаратном уровне выделяются физические события в кластере Baikal-GVD, является совпадение по времени сигналов от соседних ОМ с порогами  $\sim 0,5$  и 3 ф. э. С этой точки зрения

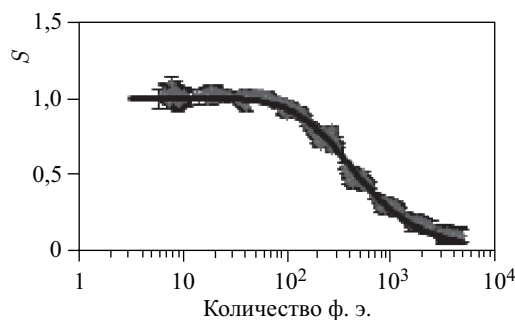


Рис. 12. Кривая насыщения измерительных каналов

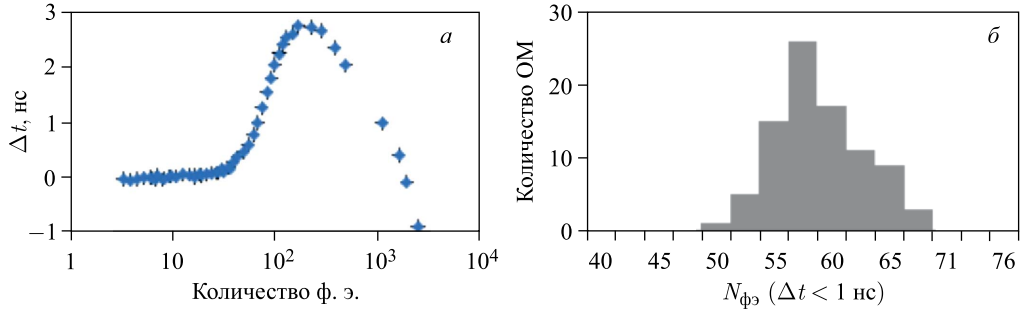


Рис. 13. Зависимость параметра  $\Delta t$  от количества фотоэлектронов в импульсе  $N_{\text{фэ}}$  (а) и распределение ОМ по граничному значению  $N_{\text{фэ}}$ , для которого  $\Delta t < 1$  нс (б)

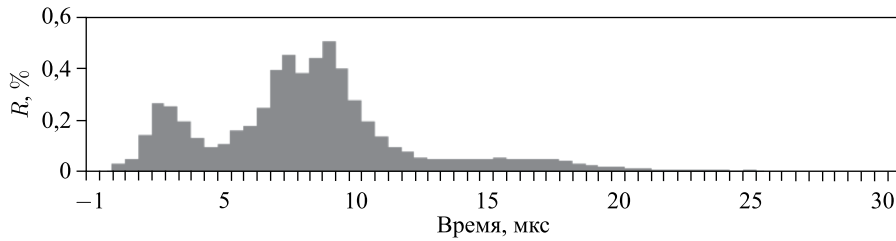


Рис. 14. Характерная временная зависимость заряда послеимпульсов в 500-нс интервалах для о. ф. э. первичного импульса

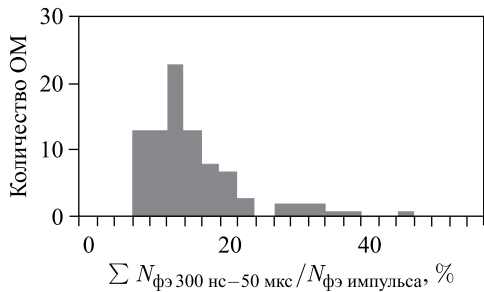


Рис. 15. Распределение ОМ по суммарному заряду послеимпульсов

важным параметром ФЭУ является доля сигналов с большой амплитудой в шумах ФЭУ. Источником высокоамплитудной составляющей шумов ФЭУ являются послеимпульсы [19], которые образуются возникающими в результате взаимодействия электронов с остаточным газом ионами, ускоренными в диодной системе ФЭУ. Оценка вклада послеимпульсов в сигнал ФЭУ была проведена с использованием светодиодных вспышек малой длительности ( $\sim 5$  нс). Суммарный заряд послеимпульсов  $N_{\text{фэ}} \text{ послеимпульсов}$  измерялся в области от

300 нс до 50 мкс от основного импульса с шагом в 500 нс для вспышек различной яркости. Заряд послеимпульсов растет практически линейно с яркостью вспышки. В качестве характеристики доли послеимпульсов использовался параметр  $R = (N_{\text{фэ}} \text{ послеимпульсов} / N_{\text{фэ}} \text{ первичного импульса}) \cdot 100 \%$ . Характерная зависимость параметра  $R$  от времени после основного импульса представлена на рис. 14.

Распределение ОМ по суммарному заряду послеимпульсов в интервале от 0,3 до 50 мкс показано на рис. 15. Доля послеимпульсов для большей части ОМ составляет 10–15 %.

В настоящее время 80 проверенных ОМ установлены в оз. Байкал в составе кластера Baikal-GVD. Все компоненты установленных ОМ работают корректно. Проводятся на-

турные исследования влияния послеимпульсов на скорость счета триггерной системы. В результате данных исследований будут сформированы критерии отбора ФЭУ по доле послеимпульсов для установки в состав телескопа.

### ВРЕМЕННАЯ КАЛИБРОВКА КАНАЛОВ

Реконструкция физических событий, регистрируемых установкой, основана на информации об амплитудах и временах регистрации импульсов каналами детектора. Калибровка амплитудных характеристик каналов основана на результатах измерений о.ф.э.-спектров ФЭУ, методика которых была представлена выше. Для временной калибровки каналов используются два взаимодополняющих подхода [20]. Первый подход основан на измерении задержек между импульсами соседних ОМ, инициированными вспышками светодиодов в одном из них. Для временной калибровки используется информация о месте расположения ОМ в телескопе. Второй подход основан на измерении индивидуальных задержек сигналов в ФЭУ и в кабельных коммуникациях. Применение второго подхода возможно в процессе проверки и калибровки ОМ в лабораторных условиях.

Для измерения задержки ФЭУ в блоке электроники ОМ предусмотрен режим работы, для которого запуск светодиода синхронизирован с формированием в контроллере «проверочного» импульса. Этот импульс поступает на вход усилителя сигналов ФЭУ совместно с сигналом, инициированным вспышкой светодиода (рис. 16). В данном случае измерения проводились в два сеанса: с проверочным импульсом и импульсом от светодиода. Однако при работе ОМ в составе телескопа используется другой режим: сигнал светодиода задерживается на фиксированную величину  $\sim 200$  нс (одна из функций контроллера ОМ), и измеряется задержка между двумя импульсами в одном событии. Задержка ФЭУ определяется как разность между импульсом от светодиода и проверочным импульсом. Кроме задержки ФЭУ (60–80 нс) в величину задержки импульсов входят задержки в сигналах запуска проверочного импульса и драйвера светодиода  $\sim 2$  нс, время пролета фотона от светодиода до поверхности фотокатода  $\sim 2$  нс, задержка усилительного тракта  $\sim 16$  нс, задержка в кабельных коммуникациях ОМ  $\sim 3$  нс. Эти задержки стабильны во времени и примерно одинаковы для всех ОМ.

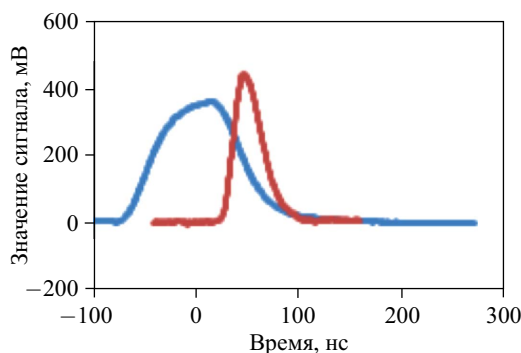


Рис. 16. Проверочный импульс и сигнал, инициированный светодиодом, задержка которого определяется задержкой ФЭУ

На рис. 17 представлена зависимость задержки сигналов 87 оптических модулей от величины высоковольтного напряжения ФЭУ, соответствующего коэффициенту усиления диодной системы  $\sim 10^7$ . Как видно из рисунка, величина задержки импульсов определяется главным образом напряжением на делителе ФЭУ.

Как указывалось выше, канал ОМ включает 90-м глубоководный кабель, по которому передается аналоговый сигнал. Различие в длине глубоководных кабелей приводит

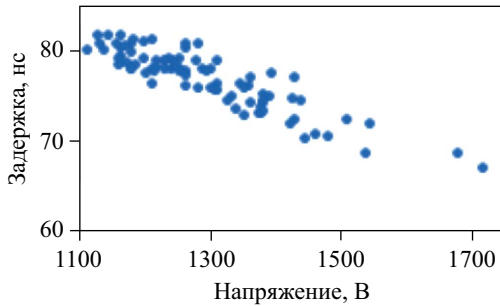


Рис. 17. Результаты временной калибровки каналов, сопоставленные с напряжением на делителе ФЭУ (коэффициенты усиления ФЭУ  $\sim 10^7$ )

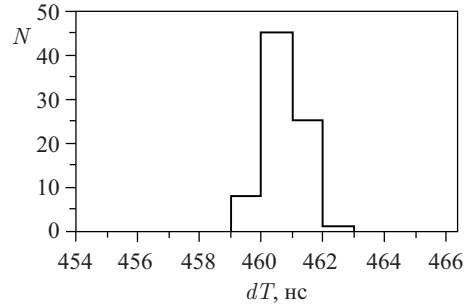


Рис. 18. Распределение кабелей ОМ по величине задержки сигнала  $dT$

к разбросу временных задержек каналов. На рис. 18 представлены результаты калибровки временных задержек глубоководных кабелей. Средний разброс задержек составляет величину  $\sim 1$  нс. Однако следует отметить, что результаты приведены для одной партии глубоководных кабелей. Для разных партий глубоководных кабелей наблюдается систематическое отклонение задержек до  $\sim 5$  нс.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптические модули нейтринного телескопа Baikal-GVD были разработаны исходя из требований к надежности и эргономике их эксплуатации: максимальной простоты сборки и монтажа. На стадии подготовки к массовому производству был подготовлен автоматизированный стенд для проверки ОМ и проведены комплексные лабораторные испытания партии из 87 ОМ. Программа испытаний включала в себя исследования о. ф. э.-спектров, временного разрешения, поведения временных и амплитудных характеристик каналов при регистрации световых импульсов большой интенсивности (до  $3 \cdot 10^3$  ф. э.), вероятности возникновения послеимпульсов ФЭУ. Полученные данные необходимы для детального моделирования отклика создаваемого нейтринного телескопа Baikal-GVD.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о достаточно полном соответствии параметров ОМ требованиям, предъявляемым к фотодетекторам установки. В области сигналов до  $\sim 50$  ф. э. (именно эта область определяет точность реконструкции параметров треков регистрируемых частиц) амплитуда выходного сигнала ОМ линейно зависит от яркости световых вспышек. Кроме того, в этом диапазоне отсутствует зависимость смещения времени регистрации сигналов от их амплитуды. Для больших сигналов разработана методика, позволяющая учитывать эффект насыщения канала и восстанавливать яркость световых вспышек с точностью не хуже 10% в области до  $10^3$  ф. э. Испытания показали, что  $\sim 10\%$  ФЭУ имеют высокую долю заряда послеимпульсов. В настоящее время проводятся натурные исследования влияния послеимпульсов на работу триггерной системы установки, на основании которых будут выработаны критерии отбора ФЭУ для нейтринного телескопа.

Данная работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 13-02-12221, 14-02-00175, 14-02-00972).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aynutdinov V. et al. (*Baikal Collab.*). The Baikal Neutrino Experiment: NT200+ and Beyond // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 572. P. 511–514.
2. Aynutdinov V. et al. (*Baikal Collab.*). The Baikal Neutrino Experiment: Status, Selected Physics Results, and Perspectives // Nucl. Instr. Meth. A. 2008. V. 588, No. 1–2. P. 99–106.
3. Aynutdinov V. et al. (*Baikal Collab.*). The Prototype String for the km<sup>3</sup>-Scale Baikal Neutrino Telescope // Nucl. Instr. Meth. A. 2009. V. 602, No. 1. P. 227–234.
4. Avrorin A. et al. (*Baikal Collab.*). An Experimental String of the NT1000 Baikal Neutrino Telescope // Instr. Exp. Tech. 2011. V. 54, No. 5. P. 649–659.
5. Avrorin A. et al. (*Baikal Collab.*). The Baikal Neutrino Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 626–627. P. S13–S18.
6. Avrorin A. et al. (*Baikal Collab.*). The Gigaton Volume Detector in Lake Baikal // Ibid. V. 639, No. 1. P. 30–32.
7. Dzhlkibaev Zh. et al. (*Baikal Collab.*). Status of the BAIKAL Neutrino Experiment // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2011. V. 75, No. 3. P. 414–415.
8. Avrorin A. et al. (*Baikal Collab.*). The Prototyping/Early Construction Phase of the BAIKAL-GVD Project // Nucl. Instr. Meth. A. 2014. V. 742. P. 82–88.
9. Avrorin A. et al. (*Baikal Collab.*). Status and Recent Results of the BAIKAL-GVD Project // Phys. Part. Nucl. 2015. V. 46. P. 211–221.
10. Aynutdinov V. et al. (*Baikal Collab.*). Prototype String for a km<sup>3</sup> Baikal Neutrino Telescope // Proc. of Roma Intern. Conf. on Astro-Particle Phys., Roma, June 20–22, 2007.
11. Avrorin A. et al. (*Baikal Collab.*). Data Acquisition System for a km<sup>3</sup>-Scale Baikal Neutrino Telescope // Proc. of the 32nd Intern. Cosmic Ray Conf., Beijing, 2011.
12. Avrorin A. et al. (*Baikal Collab.*). Data Acquisitions System of the NT1000 Baikal Neutrino Telescope // Instr. Exp. Tech. 2014. V. 57, No. 3. P. 262–273.
13. Avrorin A. et al. (*Baikal Collab.*). A Hydroacoustic Positioning System for the Experimental Cluster of the Cubic-Kilometer-Scale Neutrino Telescope at Lake Baikal // Instr. Exp. Tech. 2013. V. 56, No. 4. P. 449–458.
14. Leahy D. A. et al. (*DUMAND Collab.*). Optical Module for DUMAND II — Japanese Version // Proc. of the 23rd Intern. Cosmic Ray Conf., Alberta, Canada, July 19–30, 1993. P. 546.
15. Abbasi R. et al. (*IceCube Collab.*). The IceCube Data Acquisition System: Signal Capture, Digitization, and Timestamping // Nucl. Instr. Meth. A. 2009. V. 601. P. 294–316.
16. Abbasi R. et al. (*IceCube Collab.*). Calibration and Characterization of the IceCube Photomultiplier Tube // Nucl. Instr. Meth. A. 2010. V. 618. P. 139–152.
17. Amram P. et al. (*ANTARES Collab.*). The ANTARES Optical Module // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 484. P. 369–383.
18. Margiotta A. et al. (*KM3NeT Collab.*). The KM3NeT Deep-Sea Neutrino Telescope // Nucl. Instr. Meth. A. 2014. V. 766. P. 83–87.
19. Ma K. J. et al. Time and Amplitude of Afterpulse Measured with a Large Size Photomultiplier Tube // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 629. P. 93–100.
20. Avrorin A. et al. (*Baikal Collab.*). Time and Amplitude Calibration of the Baikal-GVD Neutrino Telescope // Proc. of the 34th Intern. Cosmic Ray Conf., The Hague, The Netherlands, 30 July–6 Aug., 2015.