

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО  
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.123

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ГИРЛЯНДА БАЙКАЛЬСКОГО НЕЙТРИННОГО  
ТЕЛЕСКОПА НТ1000

© 2011 г. А. В. Аврорин<sup>1</sup>, В. М. Айнутдинов<sup>1</sup>, И. А. Белолаптиков<sup>2</sup>, Д. Ю. Богородский<sup>3</sup>,  
Н. М. Буднев<sup>3</sup>, R. Wischnewski<sup>4</sup>, О. Н. Гапоненко<sup>1</sup>, К. В. Голубков<sup>2</sup>, О. А. Гресь<sup>3</sup>, Т. И. Гресь<sup>3</sup>,  
О. Г. Гришин<sup>3</sup>, И. А. Данильченко<sup>1</sup>, Ж.-А. М. Джилкибаев<sup>1</sup>, Г. В. Домогацкий<sup>1</sup>, А. А. Дорошенко<sup>1</sup>,  
А. Н. Дьячок<sup>3</sup>, В. А. Жуков<sup>1</sup>, А. В. Загородников<sup>3</sup>, А. М. Клабуков<sup>1</sup>, А. И. Климов<sup>5</sup>,  
К. В. Конищев<sup>2</sup>, А. В. Коробченко<sup>3</sup>, А. П. Кошечкин<sup>1</sup>, Л. А. Кузьмичев<sup>6</sup>, В. Ф. Кулепов<sup>7</sup>,  
Д. А. Кулешов<sup>1</sup>, В. И. Ляшук<sup>1</sup>, E. Middell<sup>4</sup>, М. Б. Миленин<sup>7</sup>, Р. Р. Миргазов<sup>3</sup>, С. П. Михеев<sup>1</sup>,  
Э. А. Осипова<sup>6</sup>, А. И. Панфилов<sup>1</sup>, Л. В. Паньков<sup>3</sup>, Г. Л. Паньков<sup>3</sup>, А. А. Перевалов<sup>3</sup>,  
Д. П. Петухов<sup>1</sup>, Е. Н. Плисковский<sup>2</sup>, В. А. Полещук<sup>1</sup>, Е. Г. Попова<sup>6</sup>, В. В. Просин<sup>6</sup>,  
М. И. Розанов<sup>8</sup>, В. Ю. Рубцов<sup>3</sup>, Е. В. Рябов<sup>3</sup>, О. В. Суворова<sup>1</sup>, Б. А. Таращанский<sup>3</sup>,  
С. В. Фиалковский<sup>7</sup>, Б. А. Шайбонов<sup>2</sup>, А. А. Шейфлер<sup>2</sup>, А. В. Широков<sup>6</sup>,  
Ch. Spiering<sup>4</sup>, А. С. Ягунов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерных исследований РАН

Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

<sup>2</sup>Объединенный институт ядерных исследований

Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

<sup>3</sup>Иркутский государственный университет

Россия, 664003, Иркутск, ул. Карла Маркса, 1

<sup>4</sup>Das Deutsche Elektronen Synchrotron DESY

(Научно-исследовательский центр "Германский электронный синхротрон")

Deutschland, D-15738, Zeuthen, Platanenallee, 6

<sup>5</sup>РНИЦ "Курчатовский институт"

Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

<sup>6</sup>НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына

Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Россия, 119992, Москва, Воробьевы горы, 1, стр. 2

<sup>7</sup>Нижегородский государственный технический университет

Россия, 603950, Н. Новгород, ул. Минина, 24

<sup>8</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Россия, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

Поступила в редакцию 15.02.2011 г.

В настоящее время сотрудничеством БАЙКАЛ разрабатывается проект глубоководного нейтринного телескопа НТ1000 с эффективным объемом  $\sim 1 \text{ км}^3$ . Телескоп будет размещаться в оз. Байкал в непосредственной близости от действующего детектора НТ200+. Телескоп будет состоять из 12 кластеров по 8 однотипных гирлянд оптических модулей в каждом (в гирлянде — 2 секции оптических модулей НТ1000).

Приводятся результаты разработки секции оптических модулей НТ1000 с использованием более эффективных фотоэлектронных умножителей и современной электроники. Обсуждаются результаты натурных испытаний экспериментальной гирлянды из двух секций по 6 оптических модулей. Результаты исследований используются в проекте нейтринного телескопа НТ1000 и в гидрологических исследованиях оз. Байкал.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Крупномасштабные нейтринные телескопы в естественных средах нацелены на решение широкого круга фундаментальных проблем: изучение природных потоков мюонов и нейтрино высоких энергий, поиск гипотетических частиц —

кандидатов на роль частиц темной материи и пр. С их помощью также возможно вести на качественно новом уровне междисциплинарные исследования в области наук о Земле. Успешная эксплуатация на протяжении более чем десяти лет нейтринных телескопов первого поколения —

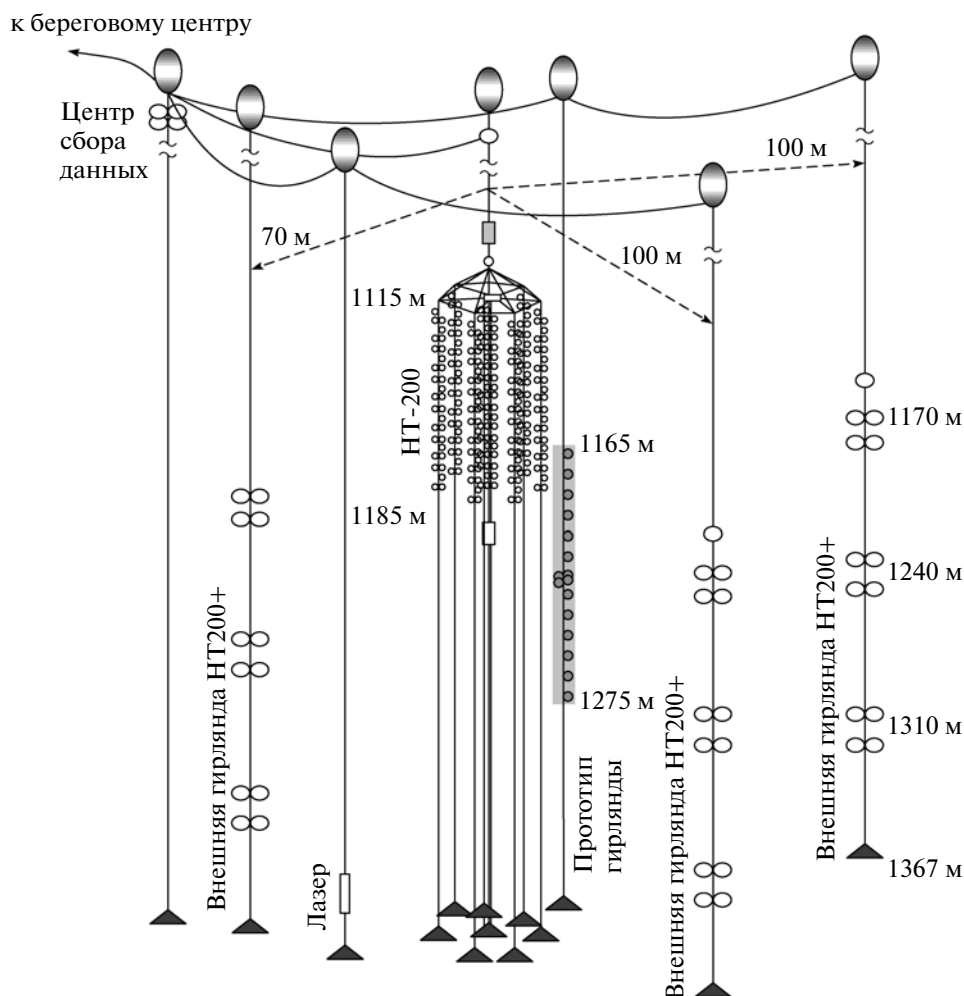


Рис. 1. Нейтринный телескоп NT200+ и экспериментальная гирлянда NT1000.

Байкальского нейтринного телескопа NT200 и установки AMANDA на Южном полюсе — доказали возможность и эффективность детектирования нейтрино в естественных средах, что позволило перейти к разработке и реализации проектов установок следующего поколения с характерным чувствительным объемом  $\sim 1 \text{ км}^3$ .

В настоящее время разрабатывается проект нейтринного телескопа NT1000 на оз. Байкал с эффективным объемом  $\sim 1 \text{ км}^3$  [1–3]. Основой для проектирования является опыт создания и многолетней эксплуатации нейтринных телескопов NT200 и NT200+ [4–6]. Установка NT200 (рис. 1) работает в оз. Байкал с 1998 г. Перечень физических исследований, проводимых на NT200, охватывает весь спектр задач, характерных для глубоководных нейтринных телескопов [7–13]. NT200 представляет собой объемную решетку из 192 оптических модулей (о.м.), расположенных, начиная с глубины 1100 м. В качестве светочувствительных элементов о.м., регистрирующих че-

ренковское излучение релятивистских мюонов и каскадных ливней, используются гибридные фотоэлектронные умножители КВАЗАР-370 [14] с полусферическим фотокатодом  $\varnothing 37 \text{ см}$ . На рис. 1 показаны также три дополнительные внешние гирлянды, расположенные на расстоянии 100 м от центра NT200, которые установлены в 2005 г. (модификация телескопа NT200+). Опыт эксплуатации NT200+ позволил исследовать особенности регистрации мюонов и каскадных ливней разреженной по сравнению с NT200 решеткой оптических модулей, расположенных на расстоянии 150–20 м между собой. Аналогичные расстояния между о.м. планируются и для NT1000.

Нейтринный телескоп NT1000 проектируется как система однотипных секций оптических модулей. Секция является функционально законченной регистрирующей системой, включающей в свой состав фотодетекторы, измерительную электронику, подсистемы управления, триггирования и передачи информации. На рис. 1 показан прототип гирлянды из двух таких секций, разра-

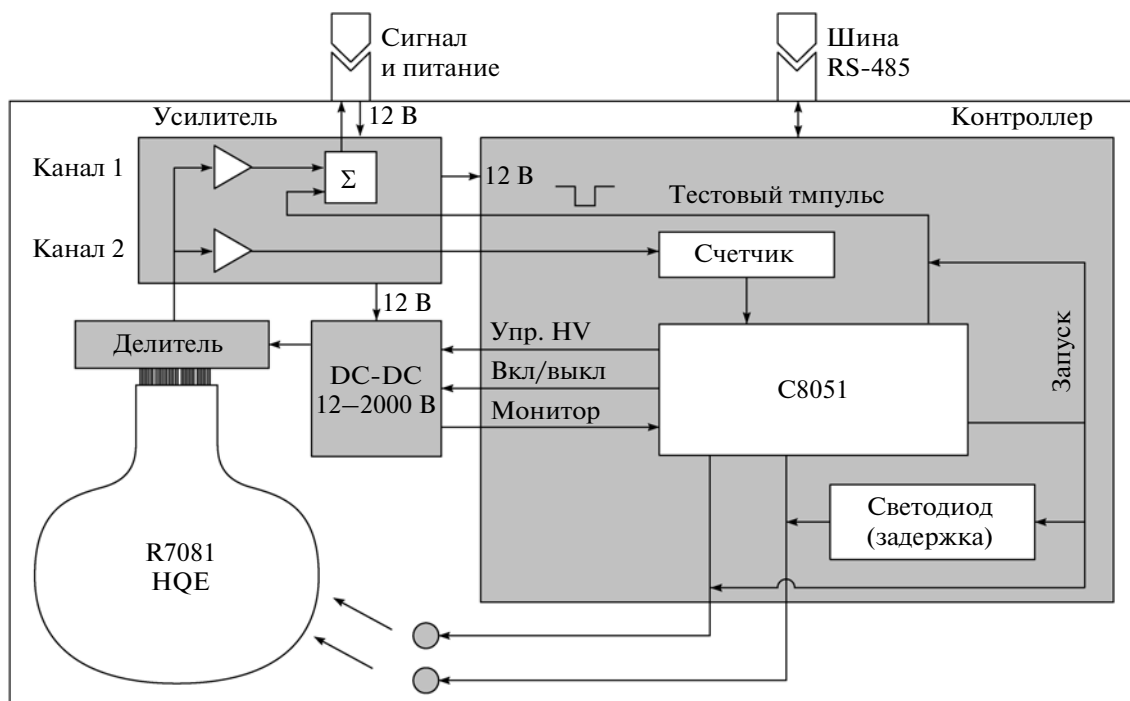


Рис. 2. Блок-схема оптического модуля.

ботанной для установки NT1000 и установленной в оз. Байкал для проведения долговременных натурных испытаний. В статье приводятся результаты разработки системы регистрации и сбора данных гирлянды оптических модулей NT1000 и обсуждаются результаты испытаний ее основных элементов.

## 2. ОПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ

Регистрирующими элементами секции являются оптические модули, которые преобразуют черенковское излучение мюонов и каскадных ливней в электрические сигналы. О.м. состоят из следующих элементов: фотоэлектронного умножителя (ф.э.у.), контроллера, усилителя сигналов, светодиодной калибровочной системы и высоковольтного преобразователя напряжения. Блок-схема о.м. представлена на рис. 2.

Выбор оптимального ф.э.у. для установки NT1000 представляет собой отдельную задачу. Основными требованиями, предъявляемыми к ф.э.у., являются высокое временное разрешение (на уровне единиц наносекунд) при большой площади фотокатода, а также максимально возможные квантовая эффективность и площадь фотокатода ф.э.у. при минимальном уровне собственных шумов. В настоящее время этим требованиям в наибольшей степени удовлетворяют ф.э.у. с полусферическим фотокатодом фирмы Hamamatsu: R8055 (площадь фотокатода ~1000 см<sup>2</sup>, квантовая эффек-

тивность ~20%) и R7081HQE (площадь ~ 500 см<sup>2</sup>, квантовая эффективность >30%). Оба ф.э.у. проходят в настоящее время испытания в оз. Байкал в составе прототипа секции NT1000.

Напряжение питания ф.э.у. (1200–1600 В) имеет положительную полярность (фотокатод заземлен). Оно подбирается индивидуально для каждого ф.э.у. из расчета, что коэффициент усиления диодной системы ф.э.у. составляет ~10<sup>7</sup>. Для обеспечения надежной работы спектрометрических каналов установки сигнал с ф.э.у. дополнительно усиливается в 10 раз, что обеспечивает как достаточно высокое значение средней величины одноэлектронного сигнала ф.э.у. (30–40 мВ) по отношению к средней амплитуде шумов спектрометрического канала, так и необходимый диапазон линейности канала (до ~100 фотоэлектронов (ф.э.)). Усилитель монтируется на одной плате с делителем напряжений ф.э.у. Первый канал усилителя используется для спектрометрических измерений, второй канал служит для усиления сигналов, поступающих на счетчик шумовых импульсов фотоэлектронного умножителя.

Управление работой оптического модуля осуществляется по глубоководной шине RS-485 через специализированный контроллер, разработанный для NT1000 на основе процессора C8051F124. Основными функциями контроллера являются:

- управление величиной высоковольтного напряжения ф.э.у.;

- амплитудная и временная калибровка спектрометрических каналов светодиодными источниками света;

- контроль основных параметров ф.э.у. и электроники о.м. в процессе длительной экспозиции.

Электропитание ф.э.у. осуществляется через делитель напряжения (полное сопротивление 18 МОм) высоковольтным DC/DC-конвертером TRACO POWER PHV12-2.0K2500P, величина выходного напряжения которого может варьироваться в диапазоне 0–2.5 кВ. Для установки рабочего значения напряжения ф.э.у. используется вход управления DC/DC-конвертера. Управляющее напряжение формируется цифроаналоговым преобразователем (ц.а.п.) контроллера в диапазоне 0–2.5 В с шагом ~1 мВ – это обеспечивает точность установки рабочего напряжения ф.э.у. не хуже 1 В.

Амплитудная и временная калибровка ф.э.у. осуществляется при помощи двух светодиодов (LED) Kingbright L7113 PBC-A. Максимум светимости светодиодов соответствует длине волны 445 нм, длительность светового импульса составляет ~5 нс. Контроллер обеспечивает прецизионное управление интенсивностью свечения светодиодов и регулирует задержку между их сигналами. Диапазон регулировки интенсивности 0– $10^8$  фотонов на вспышку, диапазон задержек – 0–1000 нс (шаг ~100 нс, погрешность установки величины задержки ~1 нс). Взаимное влияние двух каналов светодиодов друг на друга не превышает 0.5% в условиях одинаковой световой амплитуды каждого из них. Световые импульсы от светодиодов передаются на ф.э.у. по оптоволоконным кабелям длиной ~0.5 м.

Контроль работы ф.э.у. и электроники о.м. подразумевает периодический мониторинг их основных параметров и условий функционирования. Контролируемыми параметрами ф.э.у. являются величина высоковольтного напряжения, временная задержка и уровень собственных шумов ф.э.у. Для контроля величины установленного высоковольтного напряжения в делителе ф.э.у. служит мониторинг выход, напряжение на котором пропорционально полному напряжению на делителе. Величина этого напряжения измеряется аналого-цифровым преобразователем (а.ц.п.) контроллера о.м.

Методика контроля временной задержки ф.э.у. основана на измерении времени между сигналом запуска светодиода и сигналом от светодиода, зарегистрированным ф.э.у. В режиме измерения временных задержек сигнал, совпадающий по времени с сигналом запуска, подается на выходной каскад усилителя спектрометрического канала о.м. В результате формируются два сигнала, время между которыми определяется задержкой ф.э.у. Оно измеряется на центральном модуле

секции (см. ниже раздел 3) с погрешностью ~2 нс. Следует отметить, что возможность принудительного формирования сигналов на выходе о.м. используется также и для контроля работоспособности секции в целом без включения высоковольтного напряжения на ф.э.у.

Для измерения уровня собственных шумов ф.э.у. используется второй канал усилителя (коэффициент усиления ~20), сигнал с которого подается на счетчик наносекундных импульсов контроллера о.м. (рис. 2). Длительность временного окна для подсчета количества шумовых импульсов и интервал между измерениями могут быть выбраны в диапазоне от единиц миллисекунд до 10 с в зависимости от режима работы ф.э.у. Возможна регулировка порога регистрации счетчика. Минимальный рабочий порог ограничен амплитудой наводки от процессора контроллера о.м. и составляет ~10 мВ (~0.3 ф.э.).

Для контроля функционирования электроники о.м. в контроллере предусмотрена возможность измерения температуры и уровней напряжений электропитания о.м. Электропитание 12 В поступает на оптический модуль по тому же проводнику, что и сигналы ф.э.у. Объединение электропитания со спектрометрическим каналом существенно упрощает систему глубоководных кабельных коммуникаций секции НТ1000. Однако такой подход приводит к увеличению уровня шумов спектрометрического канала до 5–7 мВ из-за собственных шумов источника питания. Потребление о.м. составляет 200 мА × 12 В.

Внешний вид оптического модуля с ф.э.у. R-7081HQE показан на рис. 3. Электронные компоненты о.м. размещаются в глубоководной стеклянной сфере VITROVEX (Ø42 см), которая состоит из двух полусфер. Для надежной фиксации полусфер после сборки о.м. из него откачивается воздух до давления ~0.7 атм.

Ф.э.у. клеивается в одну из полусфер силиконовым rtv-компаундом, который обеспечивает оптический контакт между стеклами сферы и ф.э.у. Для уменьшения влияния магнитного поля Земли ф.э.у. помещается в экранирующую сетку из пермаллоя. Контроллер, усилитель и высоковольтный конвертер закрепляются на цоколе ф.э.у. Драйверы со светодиодами светоизолируются и подключаются к контроллеру о.м. через высокочастотные разъемы SMA. Свет от светодиодов поступает в центр фотокатода ф.э.у. по оптическим волокнам. Усиленный сигнал с ф.э.у. выводится из модуля через глубоководный коаксиальный разъем CP-50-862/863. Через этот же разъем вводится питание о.м. Для подключения шины управления RS-485 в о.м. используется аналогичный разъем. Между двумя разъемами размещен вакуумный клапан, на котором закреплен манометр для контроля давления внутри о.м.

### 3. СЕКЦИЯ НТ1000

Секция НТ1000 является основным регистрирующим блоком установки. Секции размещаются на вертикальных гирляндах, из которых формируются кластеры. Базовая конфигурация кластера состоит из восьми гирлянд с двумя секциями на каждой.

Блок-схема секции показана на рис. 4. Каждая секция содержит 12 о.м., центральный модуль ЦМ и сервисный модуль СМ.

Центральный модуль выполняет функции сбора данных и управления работой секции. Аналоговые сигналы от 12 о.м. поступают на центральный модуль по коаксиальным кабелям длиной ~100 м. Преобразование сигналов с ф.э.у. в цифровой код осуществляется тремя платами 4-канальных 12-разрядных а.ц.п. с частотой дискретизации 200 МГц во временном окне 15 мкс. Таким образом, в каждом канале формируются временные дорожки событий, анализ которых позволяет определить как амплитуду, так и время регистрации сигналов с оптических модулей. Для записи информации с временных дорожек в каждом канале а.ц.п. предусмотрено два кольцевых буфера, что минимизирует мертвое время каналов.

Помимо преобразования аналоговых сигналов и промежуточного хранения данных, платы а.ц.п. формируют сигналы запросов каналов. Условием выработки сигнала *Запрос* является превышение амплитуды входного сигнала его заданного значения (при этом усредняются отсчеты четырех соседних а.ц.п. на временной дорожке). Для этого на каждом канале а.ц.п. работают два цифровых компаратора, величина порогов которых регулируется программно с дискретностью ~1.4 мВ (0.05 ф.э.). В каждом канале а.ц.п. вырабатываются сигналы *Запрос* двух типов: *Низкий порог* (~0.3 ф.э.) и *Высокий порог* (~3 ф.э.).

Сигналы *Запрос* от всех каналов а.ц.п. поступают на плату *Мастер*, которая формирует *Запрос секции*. Условием выработки этого сигнала являются или совпадения нескольких сигналов *Низкий порог* (мажоритарная схема совпадений), или совпадения сигналов *Низкий порог* и *Высокий порог* от любых двух каналов соседних о.м. Информация о тех комбинациях сигналов, совпадение которых в заданном временном окне приводит к формированию сигнала *Запрос секции*, динамически загружается в память платы *Мастер* (матрица совпадений). Сигналы *Запрос секции* передаются в центр кластера по коаксиальным кабелям длиной ~1200 м, где формируется сигнал *Подтверждение* – глобальный триггер для всех секций, обеспечивающий их синхронную работу. По этому сигналу данные всех каналов а.ц.п. считываются и передаются в центр сбора данных кластера, который связан с Береговым центром оптоволоконной линией связи.

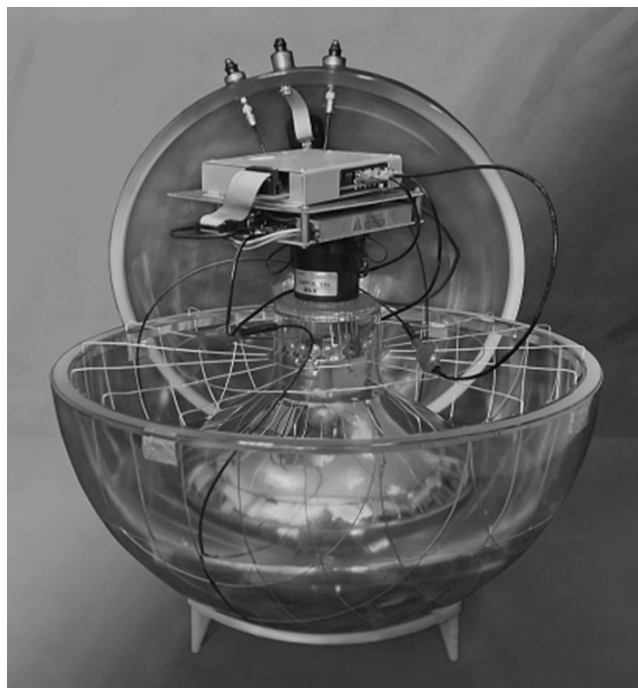


Рис. 3. Оптический модуль на основе ф.э.у. R-7081HQE.

Считывание данных секции осуществляется по каналу Ethernet платы *Мастер*, который удлиняется до необходимой длины 1200 м через DSL-модем (скорость передачи до 9 Мбит/с). Для установки режимов работы оптических модулей, калибровки и мониторинга аппаратуры, не требующих больших скоростей передачи команд и данных, используется локальная подводная шина данных RS-485 на основе ASCII-протокола. Преобразователь Ethernet – RS-485 реализован на плате *Мастер*.

Напряжение питания передается на о.м. от линейных преобразователей постоянного напряжения 300–12 В, установленных в сервисном модуле секции, через плату объединения электропитания и сигналов о.м. На этой плате также реализовано релейное управление включением о.м., позволяющее отключать модули от источника напряжения в случае возникновения короткого замыкания.

Помимо преобразователей напряжения, в сервисном модуле расположены элементы системы мониторинга и калибровки, а также блок электроники гидроакустической системы измерения координат *ГАСИК*. Система мониторинга позволяет получать информацию о величине напряжения электропитания секции и каждого о.м. (300 В, 12 В), о температуре внутри о.м., о высоковольтных напряжениях на ф.э.у. и темпе счета фоновых импульсов ф.э.у. (темпы счета определяются темновыми токами ф.э.у. и интенсивностью свечения байкальской воды). Калибровка секции осу-

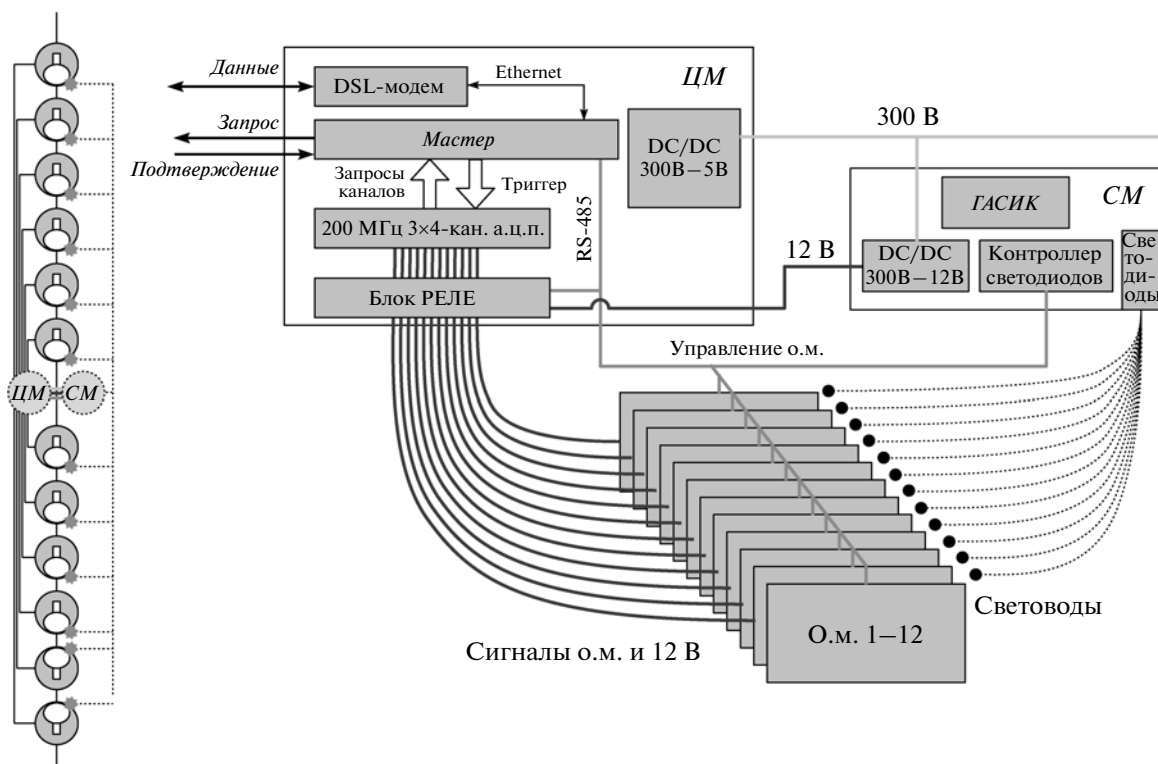


Рис. 4. Функциональная схема секции НТ1000 и ее размещение на гирлянде. ЦМ – центральный модуль, СМ – сервисный модуль, ГАСИК – гидроакустическая система измерения координат.

ществляется с помощью двух светодиодных источников, световые импульсы от которых по оптическим кабелям распределяются на все о.м. секции.

Конструкция центрального и сервисного модуля секции в значительной степени повторяет конструкцию о.м. Электроника модулей размещается в глубоководных стеклянных сферах VITROVEX. В нижнюю полусферу вклеивается алюминиевое кольцо, на котором монтируется крейт с электроникой. Для передачи сигналов и данных используются глубоководные коаксиальные разъемы CP-50-862/863. Электропитание секции (300 В), передача данных (Ethernet) и синхронизация (сигналы *Запрос* и *Подтверждение*) осуществляются через несущий кабель-трос с тремя жилами электропитания, одной витой парой и двумя коаксиальными кабелями.

#### 4. КАЛИБРОВКА СЕКЦИИ НТ1000

Установка НТ1000 предназначена для многолетней регистрации потоков космического излучения. Характеристики каналов регистрации установки могут меняться с течением времени из-за изменения параметров ф.э.у., измерительной электроники и режима эксплуатации (в частности, напряжения питания ф.э.у.). Для определения параметров, необходимых для преобразования измеряе-

мых величин (откликов ф.э.у.) в физические величины (поток фотонов и время их регистрации) проводятся временная и амплитудная калибровки. Первая служит для определения собственных временных задержек каналов (временных сдвижек), формирующихся за счет задержек в ф.э.у., электронике и кабельных коммуникациях. Вторая служит для определения функции преобразования амплитуды сигналов в количество фотоэлектронов. Для перехода от фотоэлектронов к потоку черенковских фотонов используется известное значение квантовой чувствительности фотокатода ф.э.у., которая, в свою очередь, калибруется по подводному лазерному источнику света и по потоку атмосферных мюонов.

Временная калибровка производится при помощи светодиодного источника света, расположенного в сервисном модуле. Световой импульс от источника разветвляется и подводится к каждому о.м. по оптоволоконным кабелям с калиброванной задержкой. С учетом известной временной задержки в оптическом кабеле по измеренным временам регистрации этого импульса определяются относительные временные сдвиги каждого канала. Эта методика была испытана при эксплуатации детекторов НТ200 и НТ200+ с погрешностью временной калибровки ~2 нс. Недостатком данного подхода является необходимость монтажа 12 оптоволоконных кабелей на гирлян-

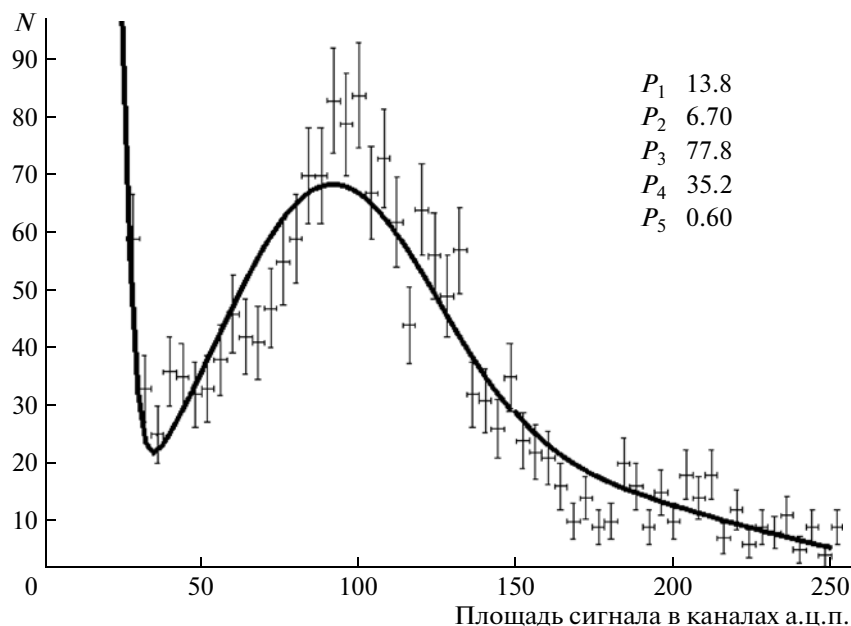


Рис. 5. Пример амплитудной калибровки по одноэлектронному спектру ф.э.у.

де, что заметно увеличивает время ее развертывания со льда оз. Байкал.

Наличие а.ц.п. в измерительных каналах секции позволяет использовать альтернативный метод временной калибровки, основанный на прямом измерении временной задержки сигнала в о.м. (методика измерения представлена в разделе 2). Для получения временных сдвижек каналов достаточно к задержке сигнала в о.м. добавить измеренную в лаборатории временную задержку в сигнальных кабелях (процедура эквивалентна калибровке задержек в оптоволоконных кабелях). Организация электроники измерительного канала НТ200 не позволяла использовать такой подход к временной калибровке, поэтому в процессе натурных испытаний секции НТ1000 (см. раздел 5) были реализованы оба подхода.

Амплитудная калибровка спектрометрических каналов базируется на широко распространенной методике измерения одноэлектронных спектров ф.э.у. с использованием светодиодной системы калибровки о.м. (раздел 2). Особенность применения этого метода в НТ1000 заключается в том, что для измерения одноэлектронного спектра используются два сигнала с двух светодиодов о.м. Одноэлектронные сигналы, формируемые первым светодиодом, регистрируются только при наличии задержанного на время  $\sim 100$  нс сигнала от второго светодиода с амплитудой  $\sim 100$  ф.э. Такой подход позволяет надежно выделять одноэлектронные сигналы из шумов ф.э.у. Пример одноэлектронного калибровочного спектра ф.э.у. показан на рис. 5. Средний заряд одноэлектронного сигнала, определенный по полученному спектру,

соответствует 78-му каналу а.ц.п. (параметр  $P_3$  на рис. 5) с учетом величины пьедестала канала (параметр  $P_1$ ).

Полученный таким образом коэффициент преобразования спектрометрического канала можно использовать только в линейной области преобразования, которая ограничена сигналами  $\sim 100$  ф.э. Именно эта область представляет основной интерес при реконструкции физических событий в НТ1000. Большие сигналы выходят за пределы динамического диапазона а.ц.п. и преобразуются нелинейно. Для того чтобы использовать амплитудную информацию в области нелинейных преобразований канала необходимо измерять его градуировочную характеристику. Измерение градуировочной характеристики канала осуществляется системой из двух светодиодов о.м. путем последовательного удвоения светового потока и регистрации соответствующего отклика о.м.

Пример градуировочной характеристики канала показан на рис. 6. При измерении градуировочной характеристики данным методом происходит накопление ошибок по мере увеличения амплитуды сигнала. Величина систематического смещения в области до  $\sim 103$  ф.э. измерена независимым методом и не превысила 10%, что соответствует статистической ошибке измерения на границе линейного диапазона.

### 5. НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СЕКЦИИ НТ1000 В ОЗ. БАЙКАЛ

Натурные испытания аппаратуры секции НТ1000 проводились в оз. Байкал в период 2008—

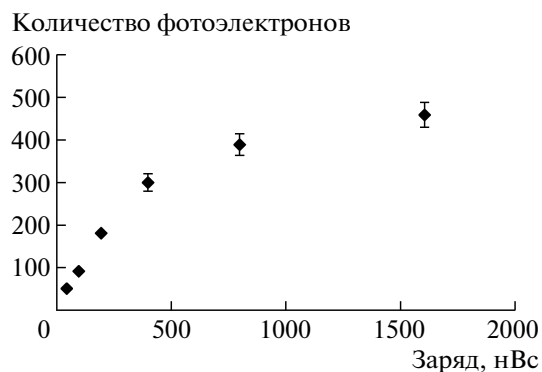


Рис. 6. Пример градуировочной характеристики спектрометрического канала.

2010 г. В 2008 г. установлена гирлянда из шести о.м. для изучения методики регистрации черенковского излучения электроникой на основе а.ц.п. В 2009 г. гирлянда расширена до 12 о.м. — две секции по 6 о.м. каждая (рис. 7). Расстояния между о.м. составляли 10 м, общая длина гирлянды — 110 м. Все ф.э.у. гирлянды, кроме двух нижних, ориентированы фотокатодом вверх. В центре гирлянды расположены два центральных модуля: сервисный и компьютерный (*PC*-сфера), выполняющих роль центра сбора данных кластера НТ1000. В гирлянде использовались ф.э.у. XR1807 с 12"-фотокатодом (Photonis) и R8055 с 13"-фотокатодом (Hamamatsu). В 2009 г. фирма Photonis прекратила выпуск ф.э.у. с 12"-фотокатодом, а фирма Hamamatsu анонсировала новый ф.э.у. R7081HQE с 10"-фотокатодом повышенной квантовой эффективности (>30%). Ф.э.у. XR1807 были заменены на R7081HQE в апреле 2010 г., и работы с экспериментальной гирляндой были продолжены до августа 2010 г.

Система управления и передачи данных гирлянды максимально приближена к базовой конфигурации, разработанной для секции НТ1000 (рис. 4). Роль центра сбора кластера выполняет компьютерный модуль, обеспечивающий формирование общего сигнала *Подтверждение* для двух секций и передачу данных в Береговой центр по каналу Ethernet через DSL-модем. Поскольку компьютерный модуль расположен в непосредственной близости от центральных модулей гирлянды, связь его с ЦМ<sub>1</sub> и ЦМ<sub>2</sub> осуществляется без использования DSL-модемов, как в базовой конфигурации аппаратуры секции. Аппаратура гидроакустической системы измерения координат ГАСИК располагалась в отдельных модулях в верхней и нижней части гирлянд.

Основной задачей, которая решалась на экспериментальной гирлянде, являлась комплексная проверка работы всех электронных узлов, глубоководных кабельных коммуникаций и несущих конструкций в условиях долговременной экспозиции

аппаратуры в потоке космического излучения. В общей сложности за период с 2008 по 2010 гг. экспериментальная гирлянда в различных конфигурациях проработала ~12 мес. За это время не было зафиксировано значимых ошибок в функционировании или нарушения герметичности основных узлов гирлянды: оптических модулей, блоков а.ц.п. и управления, глубоководных кабелей и разъемов. Перерывы в работе гирлянды связаны с выходом из строя DC/DC-конвертеров сервисного модуля. На основании этого опыта в настоящее время разработана и внедряется система грозозащиты и резервирования электропитания гирлянды.

Ключевым параметром нейтринных телескопов является угловое разрешение, которое должно быть существенно лучше 1°. Угловое разрешение зависит, в первую очередь, от точности измерения времени регистрации черенковского излучения каждым каналом детектора, которая определяется двумя параметрами регистрирующей системы: временным разрешением каналов и точностью их временной калибровки. Исследования этих параметров экспериментальной гирлянды проводились в режимах регистрации излучения от светодиодных источников, лазерного калибровочного источника и атмосферных мюонов.

Временное разрешение каналов измерялось в режиме калибровки гирлянды светодиодным источником света. Источник, расположенный в центре гирлянды в сервисном модуле, генерировал серию двойных импульсов со строго фиксированным временным интервалом (задержкой) между ними. Задержка (~500 нс) выбрана такой, чтобы оба импульса попадали во временное окно одного события. Световые импульсы передавались ко всем о.м. гирлянды по оптическим кабелям. Положение импульсов на временных дорожках каналов определялось по факту превышения фиксированного порога, выбранного на уровне ~0.5 ф.э. На рис. 8 представлены результаты измерения задержки между импульсами светодиодного источника для всех каналов гирлянды. Усредненная по всем каналам величина задержки (498.3 нс) отличается от ожидаемой (497.5 нс) на ≤1 нс. Усредненное по всем каналам среднеквадратичное отклонение задержек составляет 1.6 нс. Это значение характеризует временное разрешение канала гирлянды. Можно добиться некоторого улучшения временного разрешения, используя для определения положения импульсов на дорожке аппроксимацию их формы. Значительный разброс по величине среднеквадратичного отклонения объясняется разницей амплитуд световых импульсов (от 1 до 100 ф.э.), которая обусловлена различными условиями фокусировки света от светодиодов источника на вводы оптических кабелей. Этой причиной, в частности, объясняется



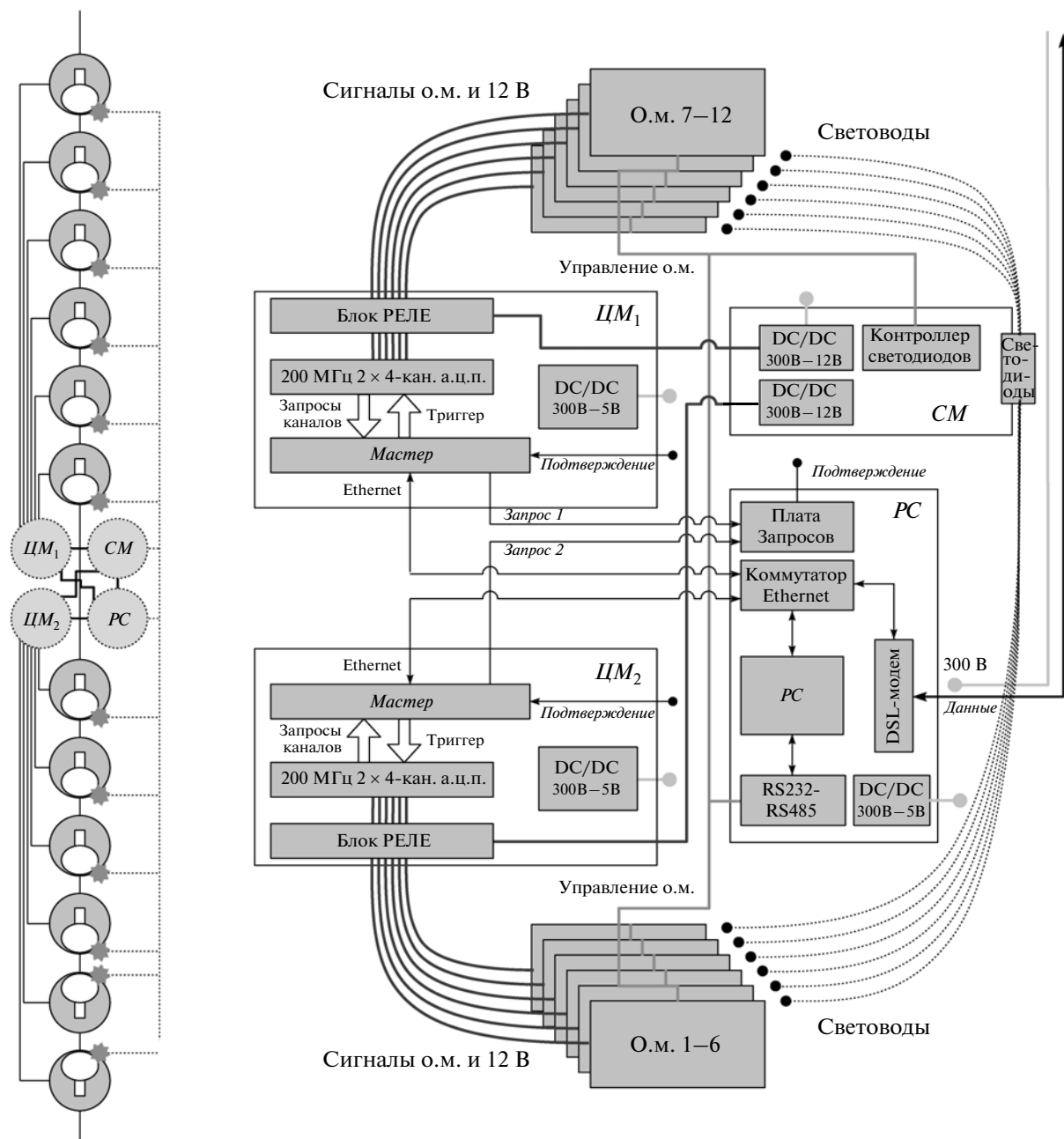


Рис. 7. Блок-схема и размещение модулей экспериментальной гирлянды из двух секций по 6 о.м. ЦМ – центральный модуль, СМ – сервисный модуль, РС – компьютерный модуль.

отсутствие информации по третьему каналу на рис. 8.

Точность временной калибровки каналов – второй фактор, влияющий на временные характеристики детектора. Калибровка подразумевает определение относительных временных сдвигов каналов  $t_{shift}$ , обусловленных разницей в задержках кабельных коммуникаций каналов и фотоэлектронных умножителей. Методика временной калибровки представлена в разделе 4. Значения калибровочных параметров  $t_{shift}$ , полученные дву-

мя методами (измерением времен регистрации общего для всех каналов сигнала от светодиодного источника света и измерением собственных задержек ф.э.у.) согласуются в пределах 3 нс, что несколько превышает ожидаемое значение 2 нс. Для последующего анализа использовались результаты светодиодной временной калибровки.

Точность измерения времени регистрации черенковского излучения каналами экспериментальной гирлянды оценивалась по результатам ее калибровки лазерным источником света (калибро-

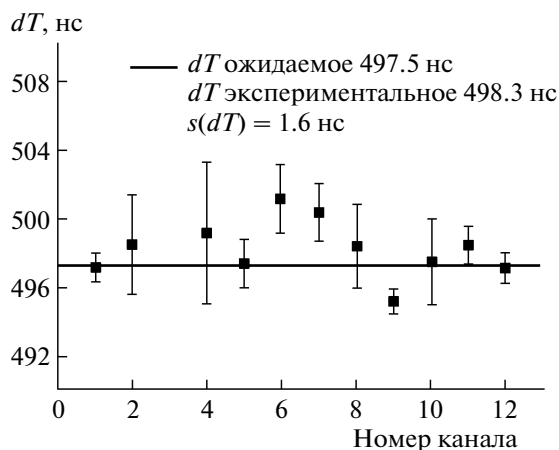


Рис. 8. Определение задержки между сигналами.

вочный лазер). Калибровочный лазер представляет собой изотропный источник света с интенсивностью излучения до  $5 \cdot 10^{13}$  фотонов/импульс при длине волны 475 нм и длительностью светового импульса  $<1$  нс. Лазерный источник расположен на расстоянии  $\sim 100$  м от экспериментальной гирлянды на глубине  $\sim 1.2$  км. Гидроакустическая система измерения координат обеспечивает точность определения взаимного расположения лазерного источника и оптических модулей гирлянды на уровне 0.2 м. Это позволяет сопоставить ожидаемое время регистрации излучения каналами гирлянды с экспериментально полученными значениями. В качестве экспериментально измеряемого параметра использовалась разность времен срабатывания каналов  $dT$ . Ниже представлены результаты сопоставления измеренных значений  $dT_{\text{изм}}$  и ожидаемых из геометрических соображений  $dT_{\text{геом}}$  в зависимости от расстояния между каналами  $dR$

$dR$ , м	$dT_{\text{изм}} - dT_{\text{геом}}$ , нс
10	0.3
20	-1.2
30	-2.2
40	0.5
50	1.3

Значения  $dT_{\text{изм}}$  получены в результате усреднения по всем комбинациям каналов, находящихся на данном расстоянии  $R$ . Полученные результаты позволяют утверждать, что точность измерения времен регистрации каналами гирлянды не хуже 3 нс, что обеспечивает необходимый уровень углового разрешения детектора НТ1000.

Анализ фоновых условий регистрации экспериментальной гирлянды в оз. Байкал не выявил новых эффектов по сравнению с ранее исследо-

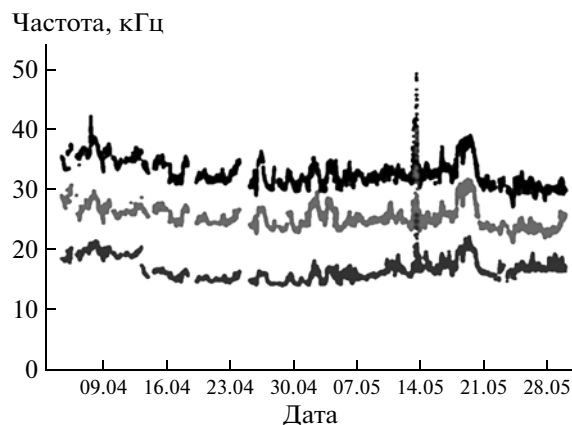
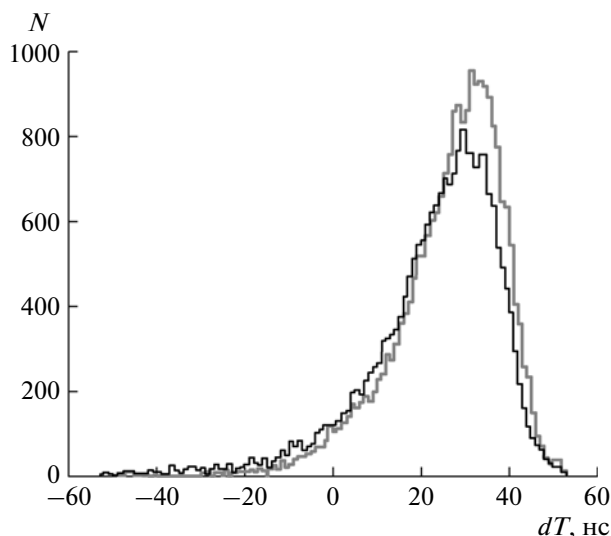


Рис. 9. Темп счета трех каналов экспериментальной гирлянды в течение двух месяцев экспозиции.

ванными на детекторе НТ200. На рис. 9 показана зависимость от времени темпа счета шумовых импульсов (порог  $\sim 0.5$  ф.э.) для трех каналов гирлянды, расположенных на расстоянии 10 м друг от друга.

Четко выраженная корреляция темпов счета каналов указывает, что существенная часть шумов ф.э.у. определяется свечением водной среды оз. Байкал. Результаты исследований показали, что природа свечения связана с процессами хемилюминесценции. Большую часть года свечение на больших глубинах относительно стабильно, однако наблюдаются периоды роста его интенсивности, во время которых темп счета шумовых импульсов увеличивается более чем в два раза. По-видимому, появление таких всплесков связано с особенностями протекания гидрофизических и гидробиологических процессов в оз. Байкал.

На основе анализа данных о потоке атмосферных мюонов выполнены исследования временных характеристик экспериментальной гирлянды в условиях, максимально приближенных к реальному режиму эксплуатации. На рис. 10 приведено экспериментально полученное распределение мюонов в зависимости от зенитного угла, построенное по разнице времен срабатываний  $dT$  пары о.м. с ф.э.у., смотрящими в верхнем направлении, в сравнение с результатами моделирования отклика гирлянды на атмосферные мюоны. Экспериментальное распределение хорошо согласуется с расчетом. Смещение распределений по временной шкале друг относительно друга составляет  $\sim 2-3$  нс. Эта величина характеризует временную точность экспериментальной гирлянды в целом, включая все источники ошибок измерения времени. Процесс регистрации и полученные характеристики для ориентированных вниз ф.э.у. будут такими же при регистрации интересующих нас событий, вызванных нейтрино из нижней полусферы.



**Рис. 10.** Распределение по разнице времен срабатывания каналов гирлянды с вверх смотрящими ф.э.у.: эксперимент и результаты моделирования отклика на атмосферные мюоны.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время сотрудничеством БАЙКАЛ разрабатывается проект глубоководного нейтринного телескопа НТ1000 с эффективным объемом  $\sim 1 \text{ км}^3$ . Телескоп будет размещаться в оз. Байкал в непосредственной близости от действующего детектора НТ200+ и будет состоять из однотипных блоков – секций о.м., разработанных специально для НТ1000 с использованием современной электронной базы и компьютерных программ. Для испытания основных элементов секции НТ1000 (оптических модулей и систем сбора и обработки данных на основе а.ц.п., системы глубоководных кабельных коммуникаций, временных параметров измерительной системы) в период с 2008 по 2010 гг. проводились исследования на экспериментальной гирлянде НТ1000, установленной в оз. Байкал и включенной в режим совместной работы с установкой НТ200+. В общей сложности с апреля 2008 по август 2010 гг. экспериментальная гирлянда в различных конфигурациях проработала  $\sim 12$  мес. За это время не было зафиксировано значимых ошибок в функционировании и нарушений герметичности основных узлов гирлянды: оптических модулей, блоков а.ц.п. и управления, глубоководных кабелей и разъемов.

Исследования временных параметров гирлянды, проведенные со светодиодным источником света, с лазерным калибровочным источником и в

режиме экспозиции в потоке атмосферных мюонов, позволили оценить точность измерения времени регистрации черенковского излучения каналами гирлянды, которая составила 2–3 нс. Полученные результаты исследований и разработок легли в основу проекта нейтринного телескопа НТ1000, завершение которого планируется в 2011 г.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (ГК 02.740.11.0018, ГК 02.518.11.7158, П1242, П2504, П133, П878, П1146, РНП 2.2.1.1/1483, РНП 2.1.1/1539, РНП 2.2.1.1/5901, НОЦ “Байкал”), Министерства науки и образования Германии, Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 08-02-00432, 08-02-00198, 10-02-10000, 09-02-00623, 09-02-12295, 10-02-10007).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aynutdinov V., Avrorin A., Balkanov V. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. Sec. A. 2009. V. 602. P. 227.
2. *Avrorin A., Aynutdinov V., Balkanov V. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. Sec. A. 2010. doi:10.1016/j.nima.2010.06.209
3. *Avrorin A., Aynutdinov V., Balkanov V. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. Sec. A. 2011. doi:10.1016/j.nima.2010.09.137
4. *Belolaptikov I., Bezrukov L., Borisovets B. et al.* // Astropart. Phys. 1997. V. 7. P. 263.
5. *Aynutdinov V., Avrorin A., Balkanov V. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. Sec. A. 2008. V. 588. P. 99.
6. *Aynutdinov V., Balkanov V., Belolaptikov I. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. Sec. A. 2006. V. 567. P. 433.
7. *Avrorin A., Aynutdinov V., Balkanov et V. et al.* // Proc. XXXI ICRC. Lodz, Poland. 2009. arXiv:0909.5562.
8. *Aynutdinov V., Avrorin A., Balkanov V. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. Sec. A. 2009. V. 602. P. 14.
9. *Aynutdinov V., Balkanov V., Belolaptikov I. et al.* // Astropart. Phys. 2006. V. 25. P. 140.
10. *Avrorin A., Aynutdinov V., Balkanov V. et al.* // Astronomy Let. 2009. V. 35. P. 651.
11. *Aynutdinov V., Balkanov V., Belolaptikov I. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. Sec. A. 2006. V. 567. P. 433.
12. *Antipin K., Aynutdinov V., Balkanov V. et al.* // Proc. XXX ICRC. Merida, Mexico. 2007. arXiv:0710.3063.
13. *Avrorin A., Aynutdinov V., Balkanov V. et al.* // Proc. XXXI ICRC. Lodz, Poland. 2009. arXiv:0910.4327.
14. *Bagdjev R., Bezrukov L., Borisovets B. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. Sec. A. 1999. V. 420. P. 138.