

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 539.123

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ НЕЙТРИННОГО ТЕЛЕСКОПА BAIKAL-GVD С ПОМОЩЬЮ ВНЕШНИХ ГИРЛЯНД ОПТИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

© 2023 г. А. В. Аврорин^а, А. Д. Аврорин^а, В. М. Айнутдинов^{а,*}, В. А. Аллаhverдян^б,
З. Бардачова^с, И. А. Белолоптиков^б, И. В. Борина^б, Н. М. Буднев^д, А. Р. Гафаров^д,
К. В. Голубков^а, Н. С. Горшков^б, Т. И. Грес^д, Р. Дворнишки^{б,с}, Ж.-А. М. Джилкибаев^а,
В. Я. Дик^{б,г}, Г. В. Домогацкий^а, А. А. Дорошенко^а, А. Н. Дячок^д, Т. В. Елзов^б, Д. Н. Заборов^а,
В. К. Кебкал^е, К. Г. Кебкал^е, В. А. Кожин^г, М. М. Колбин^б, К. В. Конищев^б, А. В. Коробченко^б,
А. П. Кошечкин^а, М. В. Круглов^б, М. К. Крюков^а, В. Ф. Кулепов^г, Ю. М. Малышкин^б,
М. Б. Миленин^а, Р. Р. Миргазов^д, В. Назари^б, Д. В. Наумов^б, Д. П. Петухов^а,
Е. Н. Плисковский^б, М. И. Розанов^б, В. Д. Рушай^б, Е. В. Рябов^д, Г. Б. Сафронов^а,
Д. Сеитова^{б,г}, А. Э. Сиренко^б, А. В. Скурихин^г, А. Г. Соловьев^б, М. Н. Сорокинов^б,
А. П. Стромаков^а, О. В. Суворова^а, В. А. Таболенко^д, Б. А. Тарашанский^д, Л. Файт^г,
А. Хатун^с, Е. В. Храмов^б, Б. А. Шайбонов^б, М. Д. Шелепов^а, Ф. Шимковиц^{б,с,г},
И. Штекль^г, Э. Эцкерова^с, Ю. В. Яблокова^б

^аИнститут ядерных исследований РАН

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

^бОбъединенный институт ядерных исследований, Дубна Московской обл., Россия

^сComenius University, Братислава, Словакия

^дИркутский государственный университет, Иркутск, Россия

^еEvoLogics GmbH, Берлин, Германия

^гНИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

^зНижегородский государственный технический университет, Нижний Новгород, Россия

^бСанкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Санкт-Петербург, Россия

^иCzech Technical University in Prague, Прага, Чешская Республика

^жИнститут ядерной физики МЭ, Алматы, Республика Казахстан

*e-mail: aynutdin@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.12.2022 г.

После доработки 08.03.2023 г.

Принята к публикации 12.03.2023 г.

В оз. Байкал продолжается развертывание глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD. К апрелю 2022 г. было введено в эксплуатацию 10 кластеров телескопа, в состав которых входит 2880 оптических модулей. Одной из актуальных задач Байкальского проекта является исследование возможности увеличения эффективности регистрации детектора на основе опыта его эксплуатации и результатов, полученных на других нейтринных телескопах за последние годы. В данной работе рассматривается вариант оптимизации конфигурации телескопа путем установки дополнительной гирлянды оптических модулей между кластерами детектора (внешней гирлянды). Экспериментальная версия внешней гирлянды была установлена в оз. Байкал в апреле 2022 г. В работе представлены результаты расчетов эффективности регистрации нейтринных событий для новой конфигурации установки, техническая реализация системы регистрации и сбора данных внешней гирлянды и первые результаты ее натурных испытаний в оз. Байкал.

DOI: 10.31857/S0032816223040110, EDN: RBVBMX

ВВЕДЕНИЕ

Нейтринная астрофизика является новой областью физических исследований. Меньше десяти

лет прошло после регистрации первых нейтрино астрофизической природы на установке IceCube. Это, в частности, обусловлено масштабностью де-

текторов нейтрино высокой энергии — нейтринных телескопов. В настоящее время в мире на разных стадиях развертывания работают три нейтринных телескопа: IceCube на Южном полюсе [1], KM3Net в Средиземном море [2] и Baikal-GVD [3] в оз. Байкал. В настоящее время лидером в области нейтринной астрофизики является нейтринный телескоп IceCube. На нем впервые были выделены кандидаты на нейтрино астрофизической природы в трековом и каскадном режимах регистрации и исследован их энергетический спектр. Вторым по масштабам нейтринным телескопом является Baikal-GVD — крупнейший глубоководный черенковский детектор Северного полушария. Первый полномасштабный кластер Baikal-GVD был введен в эксплуатацию в 2016 г. За последующие 6 лет количество кластеров Baikal-GVD было увеличено до десяти (2880 фотодетекторов — оптических модулей).

В настоящее время одной из актуальных задач Байкальского проекта является исследование возможности увеличения эффективности регистрации детектора на основе опыта его эксплуатации и результатов, полученных на других нейтринных телескопах за последние годы. Решение этой задачи, в частности, создаст необходимые предпосылки для разработки проекта нейтринного телескопа следующего поколения с эффективным объемом масштаба 10 км^3 . Именно такой масштаб установки, как показывают эксперименты на нейтринных телескопах, позволит перейти от наблюдения диффузного потока астрофизических нейтрино к исследованию источников их образования. Исследования проводятся в следующих направлениях: разработка нового глубоководного фотодетектора (оптического модуля) с увеличенной чувствительной площадью, изучение возможности модернизации системы сбора данных телескопа на основе оптоволоконных линий связи, оптимизация конфигурации регистрирующей системы телескопа. В данной работе рассматривается вариант оптимизации конфигурации телескопа путем установки дополнительных внешних гирлянд оптических модулей между кластерами телескопа в геометрическом центре каждой тройки кластеров. Термин внешняя гирлянда подчеркивает, что она размещается за границей рабочего объема кластера.

Экспериментальная версия внешней гирлянды была установлена в оз. Байкал в апреле 2022 г. В работе представлены результаты расчетов эффективности регистрации нейтринных событий для новой конфигурации установки, техническая реализация системы регистрации и сбора данных внешней гирлянды и первые результаты ее натурных испытаний в составе Байкальского телескопа.

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНФИГУРАЦИИ BAIKAL-GVD

Нейтринный телескоп Baikal-GVD расположен в южной части оз. Байкал. Глубина озера в месте дислокации установки составляет 1366 м. Регистрация излучения в установке Baikal-GVD осуществляется оптическими модулями (ОМ) [4]. В качестве светочувствительного элемента ОМ используется фотоэлектронный умножитель Hamamatsu R7081-100. Оптические модули размещаются на гирляндах, установленных на якорях на дне оз. Байкал, и сгруппированы в кластеры. Кластер включает в свой состав центральную гирлянду и семь гирлянд, равномерно расположенных по окружности радиусом 60 м. Каждая гирлянда состоит из 36 ОМ, размещенных с шагом 15 м на глубинах от 750 до 1275 м. Оптические модули ориентированы фотокатодами вниз, что повышает эффективность регистрации событий из нижней полусферы и предотвращает потери излучения из-за накопления осадков в верхней части стеклянного глубоководного корпуса оптического модуля.

Оптимизация конфигурации кластеров (расстояния между гирляндами и ОМ) с целью достижения максимальной чувствительности телескопа к потоку астрофизических нейтрино проводилась для нейтринного спектра вида E^{-2} . При этих условиях оптимальное расстояние между кластерами составило 300 м. Энергетический спектр астрофизических нейтрино, в последствии измеренный на установке IceCube, имеет большее значение показателя — $E^{-2.46}$ [5]. С учетом более крутого спектра расстояние между кластерами в 2022 г. было уменьшено с 300 до 250 м и предприняты меры для увеличения чувствительности межкластерного рабочего объема установки. С точки зрения технической реализации, наиболее эффективным способом повышения чувствительности телескопа является установка дополнительных гирлянд в геометрических центрах каждой тройки кластеров Baikal-GVD — внешних гирлянд (рис. 1).

Для оценки эффекта, связанного с установкой дополнительных внешних гирлянд, моделировался отклик детектора в режимах регистрации мюонов и каскадных ливней, генерированных в нейтринных событиях. Конфигурация регистрирующей системы внешней гирлянды полностью повторяла конфигурацию базовых гирлянд установки. Она включала в себя 36 ОМ, расположенных на расстояниях 15 м по вертикали. Для мюонных событий, имеющих протяженность, превышающую геометрические размеры телескопа, эффективная площадь установки для регистрации нейтрино увеличилась пропорционально числу ОМ, что означало отсутствие значимого эффекта от установки внешних гирлянд. Можно отметить только более изотропную чувствитель-

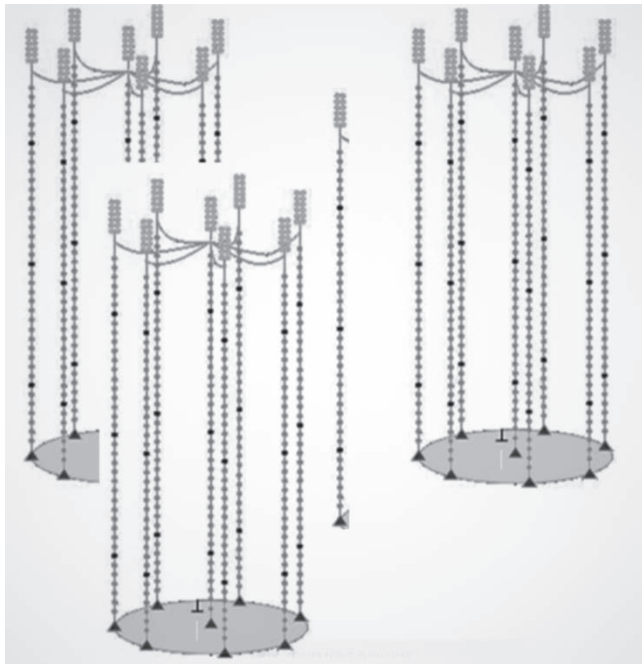


Рис. 1. Внешняя гирлянда, расположенная в геометрическом центре трех кластеров Baikal-GVD.

ность телескопа, в состав которого включены внешние гирлянды, к потоку околоразрывных мюонов.

При регистрации каскадов — квазиточечных источников излучения (характерная длина каскадов меньше расстояния между оптическими модулями) — ситуация существенно другая. Для оценки эффекта от установки внешней гирлянды было разыграно 10^4 вершин взаимодействия электронных нейтрино для конфигурации регистрирующей системы, представленной на рис. 1. В каждой вершине равномерно разыгрывалось 20

значений косинуса зенитного угла. Для каждого зенитного угла разыгрывалось 20 значений азимутального угла. Для каждого направления было разыграно равномерно 50 значений первичной энергии нейтрино по спектру $E^{-2.46}$ от 1 до 10^5 ТэВ. Критерием отбора событий являлось ограничение на количество сработавших каналов в кластере $N_{hit} > 30$. Это требование обеспечивает надежное подавление фона от групп атмосферных мюонов. Распределения событий по расстоянию ρ до внешней гирлянды для двух конфигураций телескопа (расстояния между центрами кластеров 250 и 300 м) представлены на рис. 2.

При расстоянии между кластерами 250 м для конфигурации, состоящей из 25 гирлянд (24 гирлянды в составе трех кластеров и внешняя гирлянда), количество зарегистрированных событий увеличилось на 10% по сравнению с базовой конфигурацией (24 гирлянды). Для расстояния между кластерами 300 м рост числа событий составил 5%. Аналогичные расчеты были проведены и для спектра нейтрино вида E^{-2} . В этом случае рост числа зарегистрированных событий составил 30% и 10% для расстояний между кластерами 250 и 300 м соответственно. В случае отбора каскадных ливней с энергией > 100 ТэВ из области, где фон событий от атмосферных мюонов и нейтрино становится меньше сигнала от астрофизических нейтрино, рост числа событий составит 24% для спектра вида $E^{-2.46}$ при расстоянии между кластерами 250 м. Полученные результаты показывают значимое увеличение эффективности телескопа в конфигурации, содержащей внешнюю гирлянду. Это инициировало проведение экспериментальных исследований характеристик оптимизированной конфигурации телескопа.

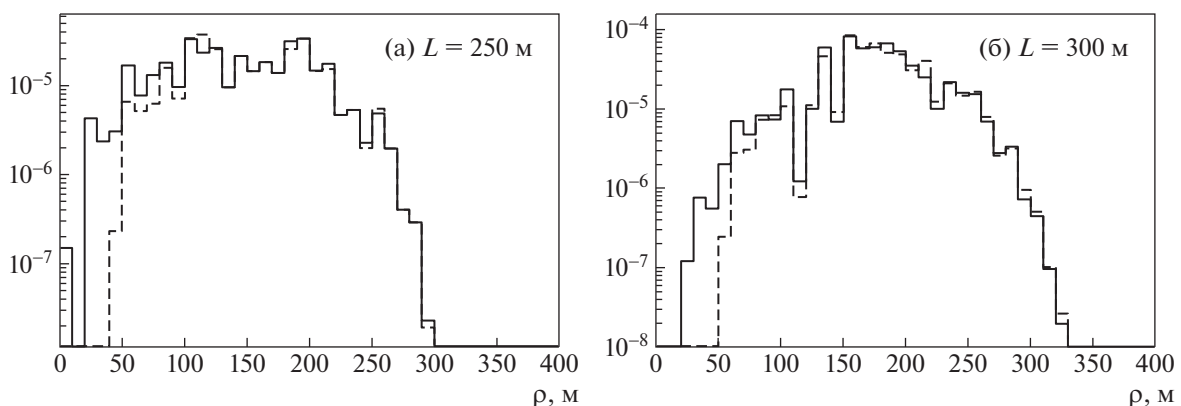


Рис. 2. Распределения событий по расстоянию ρ от внешней гирлянды для двух конфигураций: при расстоянии между центрами кластеров 250 м (а) и 300 м (б). Сплошные линии — конфигурация с внешней гирляндой, штриховые — без внешней гирлянды.

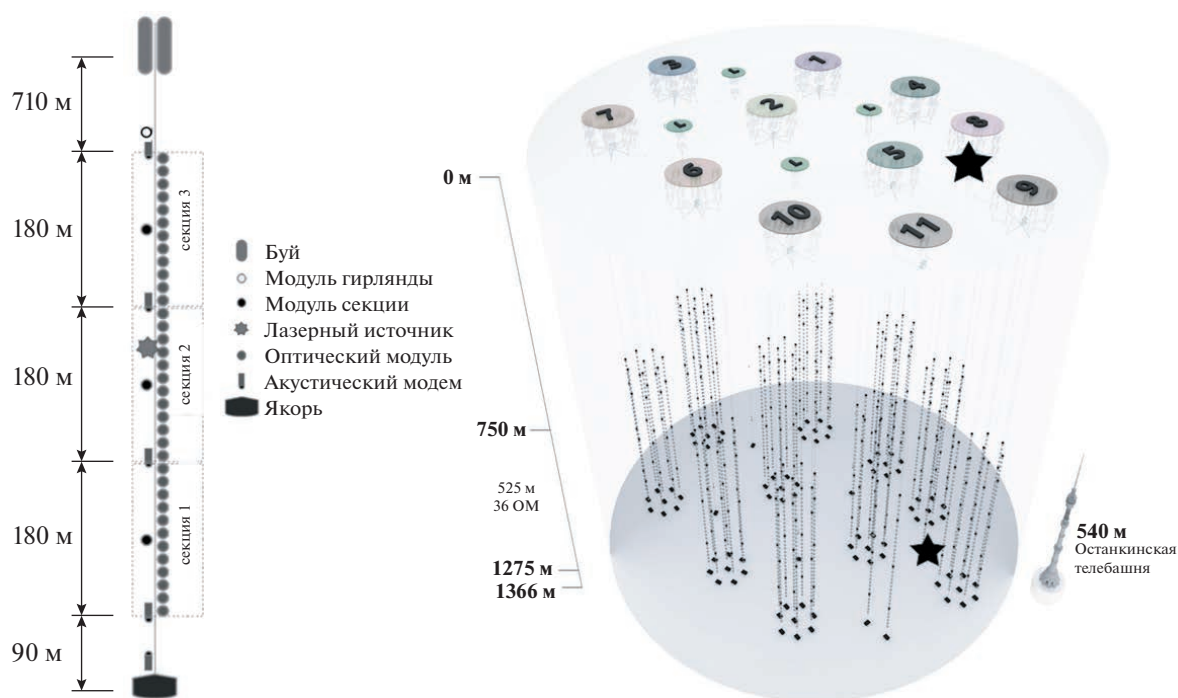


Рис. 3. Структура внешней гирлянды и конфигурация Baikal-GVD 2022 г., звездочкой отмечено положение внешней гирлянды в установке.

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ВНЕШНЕЙ ГИРЛЯНДЫ

Первая внешняя гирлянда была установлена и введена в эксплуатацию в составе нейтринного телескопа Baikal-GVD в апреле 2022 г. К этому времени Baikal-GVD состоял из десяти полномасштабных кластеров. Конфигурация телескопа 2022 г. представлена на рис. 3. Цифры соответствуют номерам кластеров (нумерация соответствует последовательности их ввода в эксплуатацию), символом *L* обозначены технологические гирлянды, в состав которых входят лазерные калибровочные источники. Звездочками отмечено положение внешней гирлянды.

Система регистрации и сбора данных внешней гирлянды в основном идентична базовым гирляндам кластера [6]. Гирлянда состоит из трех секций ОМ (первая секция расположена внизу гирлянды, см. рис. 3). В состав каждой секции входит 12 ОМ, до двух акустических модемов системы позиционирования [7, 8] и модуль управления секцией. Оптические модули и акустические модемы подключаются к модулю управления секцией, функциями которого являются управление работой ОМ, формирование локального триггера, преобразование аналоговых сигналов (фотоэлектронного умножителя в цифровой вид (частота дискретизации 200 МГц), сбор и первичная обработка данных. На основе данных, поступающих с аналого-цифрового преобразователя, формируются

временные кадры событий, содержащие информацию о форме импульсов, регистрируемых на каналах. Управление работой секций, формирование триггера гирлянды и обмен информацией обеспечивает отдельный глубоководный электронный блок — модуль гирлянды.

Внешняя гирлянда подключена к центру управления девятым кластером. Центр управления кластером расположен на глубине около 30 м и связан с береговой станцией гибридным оптоволоконным кабелем, обеспечивающим электропитание кластера и передачу данных. Подключение внешней гирлянды осуществляется через глубоководный 9-контактный коннектор, ранее предусмотренный для “лазерной гирлянды”, предназначенной для межкластерной временной калибровки. В базовой конфигурации кластера коннектор использовался для электропитания и управления лазерными источниками света. При подключении внешней гирлянды через этот коннектор была организована передача дополнительных триггерных сигналов: локального триггера внешней гирлянды (*запрос*) и общего триггера кластера (*подтверждение*).

Данные от секций внешней гирлянды передаются в модуль гирлянды и оттуда — в центр кластера через удлинители Ethernet IEX-402-SHDSL, после чего транслируются на береговую станцию по оптоволоконной линии связи. Считывание данных с внешней гирлянды осуществляется при

поступлении на нее сигнала *подтверждение* аналогично остальным гирляндам кластера. Единственное отличие внешней гирлянды от базовых гирлянд кластера заключается в том, что в ее центральной части размещается лазерный калибровочный источник излучения, подключенный к модулю управления средней секцией. Лазерный источник излучает на длине волны 532 нм, энергия в импульсе составляет 0,37 мДж ($\sim 10^{15}$ фотонов) при длительности вспышки ~ 1 нс. Лазерный источник позволяет осуществлять комплексную оценку эффективности временной и амплитудной калибровки каналов, точности позиционирования ОМ и корректности временной синхронизации кластеров. В состав лазерного источника входит система излучения света, система контроля стабильности интенсивности излучения, управляемый аттенюатор и диффузор, обеспечивающий формирование потока излучения.

Временная калибровка каналов внешней гирлянды осуществляется при помощи светодиодных источников, размещенных в ОМ, аналогично базовым гирляндам кластера. Временные сдвиги между каналами обусловлены разностью в длинах кабелей оптических модулей, секций и гирлянд, а также зависимостью временной задержки каналов от высоковольтного напряжения фотоэлектронных умножителей. Калибровочные источники света разработаны на основе светодиодов с длиной волны в максимуме излучения 470 нм и длительностью импульса ~ 5 нс. Световой импульс формируется в конусе раствором 15° . В каждом оптическом модуле установлено два калибровочных источника со светодиодами, ориентированными в верхнем направлении и предназначенными для относительной временной калибровки каналов гирлянды. Из-за малого раствора угла их излучения свет от них не регистрируется фотодетекторами соседних гирлянд. Поэтому для определения временных сдвижек между каналами внешней гирлянды и гирляндами окружающих ее кластеров используются две матрицы светодиодов, которые устанавливаются в ОМ средней и верхней секций внешней гирлянды. Матрицы состоят из десяти светодиодных источников, ориентированных горизонтально и расположенных равномерно по окружности.

НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНЕШНЕЙ ГИРЛЯНДЫ

Точность восстановления геометрии событий (направления движения мюонов, положения оси каскадов и вершины их взаимодействия) в нейтринном телескопе зависит от точности измерения времени регистрации сигналов, поступающих с фотоэлектронных умножителей. Ошибки, возникающие при измерении времени регистрации, определяются двумя факторами: точностью

измерения относительных временных сдвижек каналов (временной калибровкой) и неопределенностью времен регистрации сигналов (временной синхронизацией). Натурные испытания, проведенные в 2022 г., помимо долговременных исследований корректности работы аппаратуры внешней гирлянды, включали в себя и исследования точности ее временной калибровки и синхронизации с другими гирляндами телескопа.

Аппаратура системы временной калибровки телескопа была разработана для базового варианта Baikal-GVD, в котором расстояния между гирляндами составляет 60 м. При этом условии точность калибровки каналов составляет ~ 2 нс. При увеличении до ~ 80 м расстояния от калибровочного источника при длине поглощения света в байкальской воде 22 м величина калибровочного сигнала уменьшается более чем в пять раз, что сказывается на точности временной калибровки внешней гирлянды. Для исследования данной точности в период с апреля по сентябрь 2022 г. было проведено несколько серий калибровочных измерений. В качестве калибровочных источников использовались светодиодные матрицы, установленные на внешней гирлянде. Пример калибровочного события, зарегистрированного на трех кластерах, представлен на рис. 4. Кружками выделены сработавшие каналы, цвет показывает время регистрации сигналов в каналах. Нулевой отсчет времени находится в середине временного кадра события длительностью 5 мкс и соответствует моменту регистрации сигнала *подтверждение* аппаратурой модуля секции, инициированного *запросом* этой секции. Выбор шкалы времени осуществляется на этапе настройки установки при помощи программируемых задержек времен формирования кадров событий.

Для вычисления относительных временных сдвижек между каналами внешней гирлянды и базовых гирлянд кластеров определялась разность ΔT между ожидаемыми из геометрии dT_0 и измеренными dT задержками между сигналами, зарегистрированными на этих гирляндах. Каналы в пределах каждой гирлянды калибровались при помощи вертикальных светодиодов, встроенных в каждый ОМ. От вспышки матрицы светодиодов срабатывает несколько каналов на каждой гирлянде. Это позволяет оценить точность калибровки, которая определяется разбросом измеренных для этих каналов значений ΔT . Для того чтобы минимизировать вклад в ошибку измерений неопределенности в определении положения ОМ акустической системой позиционирования (~ 30 см), разность значений ΔT определялась для пар соседних каналов на одной гирлянде. Точность калибровки характеризовалась средним абсолютным значением параметра $\tau = (\Delta T_i - \Delta T_{i+1})$, где i — номер канала. На рис. 5 показаны примеры распределения

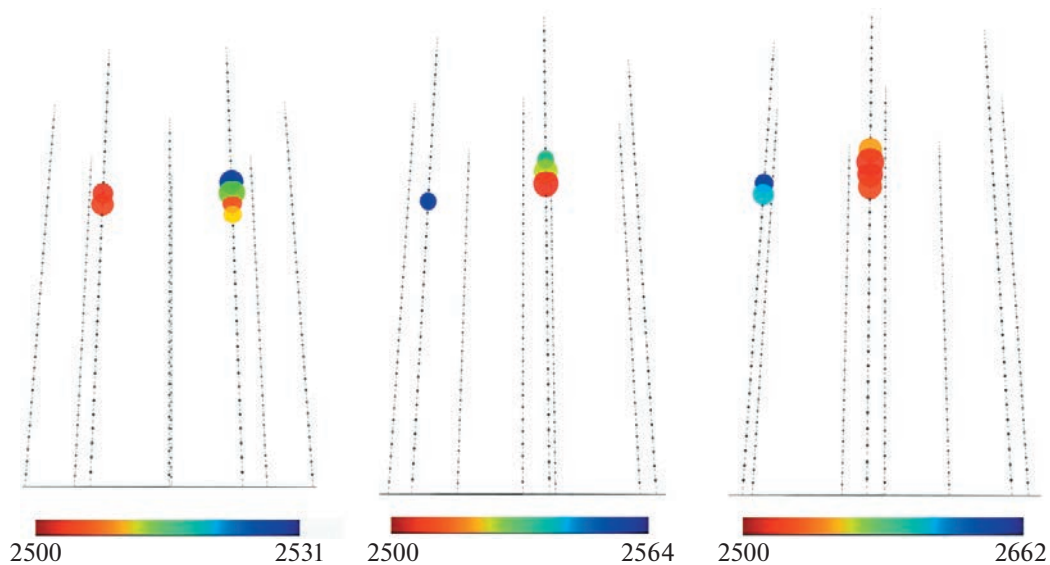


Рис. 4. Вид калибровочного события от матрицы внешней гирлянды на трех окружающих ее кластерах телескопа в проекциях на источник излучения. Шкала времени регистрации представлена под каждым рисунком в наносекундах.

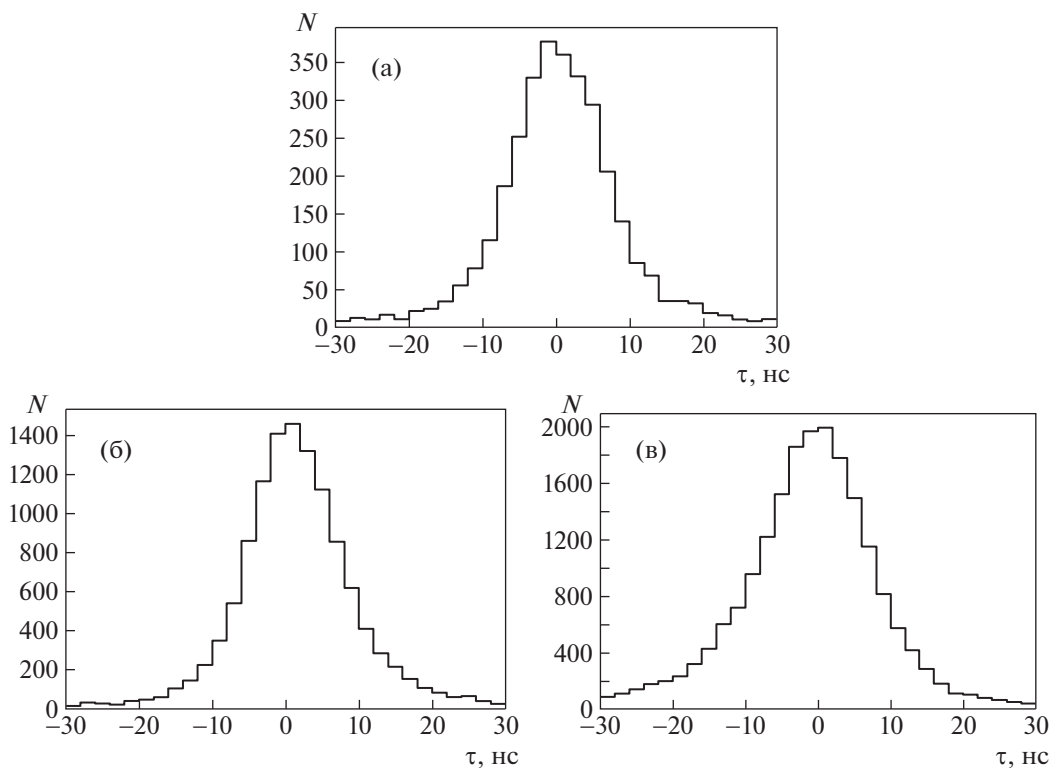


Рис. 5. Примеры распределения событий по величине параметра τ в режиме калибровки внешней гирлянды относительно кластеров 5 (а), 8 (б) и 9 (в).

калибровочных событий по величине параметра τ , измеренного для внешней гирлянды относительно гирлянд кластеров 5, 8 и 9.

Пример результатов временной калибровки внешней гирлянды относительно окружающих ее

кластеров для одной серии калибровочных измерений показан в табл. 1. Здесь представлено расстояние R от внешней гирлянды до ближайших базовых гирлянд окружающих ее кластеров, количество каналов K базовых гирлянд, по которым

проводилась временная калибровка, средний заряд Q на каналах, измеренный в фотоэлектронах (ф.э.), и средняя величина абсолютных значений параметра τ , вычисленная по парам каналов гирлянды.

Неопределенность временной калибровки внешней гирлянды относительно кластеров телескопа составила менее 3 нс, что близко к значению, полученному при калибровке базовых гирлянд телескопа, и является приемлемым с точки зрения решения задачи восстановления геометрии физических событий в телескопе [9]. Величина неопределенности калибровки определяется рассеянием света в воде, которое при расстояниях от источника ~80 м становится существенным и не учитывается при расчете времен срабатывания каналов. Заряды сигналов на калибровочных каналах варьируются от канала к каналу в пределах от 2 до 10 ф.э., в среднем около 4 ф.э. Следует отметить, что величина заряда слабо коррелирует с расстоянием от внешней гирлянды до кластера. Это связано с тем, что для светодиодов калибровочных матриц не проводился специальный отбор по максимальной величине излучаемого светового импульса. Значение максимального сигнала для разных экземпляров светодиодов может значительно различаться (в 3–4 раза), что нарушает изотропность светового потока от калибровочной матрицы.

Система временной синхронизации Baikal-GVD обеспечивает работу всех каналов установки в условиях единой шкалы времени. Она включает в себя две подсистемы, обеспечивающие синхронизацию каналов в пределах одного кластера и синхронизацию кластеров друг с другом [9]. Работа этих подсистем основана на разных принципах. Синхронизация каналов в пределах одного кластера осуществляется при помощи общего триггера, формируемого в центре управления кластером и транслируемого на все его секции. Для синхронизации работы кластеров на каждом из них измеряется время формирования общего триггера. Измерение осуществляется двумя неза-

Таблица 1. Калибровка внешней гирлянды относительно кластеров телескопа

Номер кластера	R , м	K	Q , ф.э.	τ , нс
Кластер 5	85	5	3.6	2.8
Кластер 8	80	2	4.6	0.4
Кластер 9	77	3	3.5	2.5

висимыми системами: WR (White Rabbit) [10] и SSBT (Synchronization System of Baikal Telescope) [9], последняя специально разработана для Baikal-GVD.

Для исследований работы системы синхронизации внешней гирлянды был проведен анализ данных калибровочных измерений в режиме одновременной засветки гирлянды и окружающих ее кластеров лазерным источником света, расположенным на внешней гирлянде.

В качестве параметра, характеризующего точность синхронизации, использовалась величина среднеквадратичного отклонения (СКО) измеренной задержки dt времен срабатываний пар синхронизируемых каналов. Для анализа отбирались каналы, для которых средний заряд сигналов от лазера превышал 10 ф.э. Это позволило минимизировать влияние статистической ошибки измерения времен регистрации сигналов.

Рисунок 6 иллюстрирует точность синхронизации гирлянды с окружающими ее кластерами 5, 8 и 9. Следует подчеркнуть, что синхронизация внешней гирлянды с кластером 9, в состав которого она входит как девятая гирлянда, осуществлялась по общему триггеру кластера, в то время как для кластеров 5 и 8 дополнительно измерялось время между триггерами кластеров при помощи системы WR. Точность временной синхронизации внешней гирлянды (СКО) с окружающими ее кластерами составила 2.1–2.2 нс, что хорошо согласуется с ожидаемым значением 2.0 нс, которое определяется дискретностью времен фиксации триггерного сигнала аппаратурой секций установки, равной 5 нс.

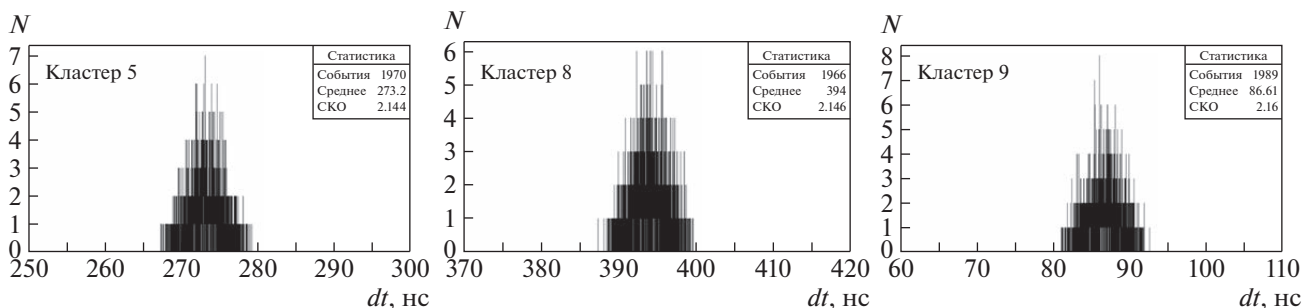


Рис. 6. Распределение событий по разнице времен регистрации сигналов dt внешней гирляндой относительно ближайших к ней гирлянд кластеров 5, 8 и 9.

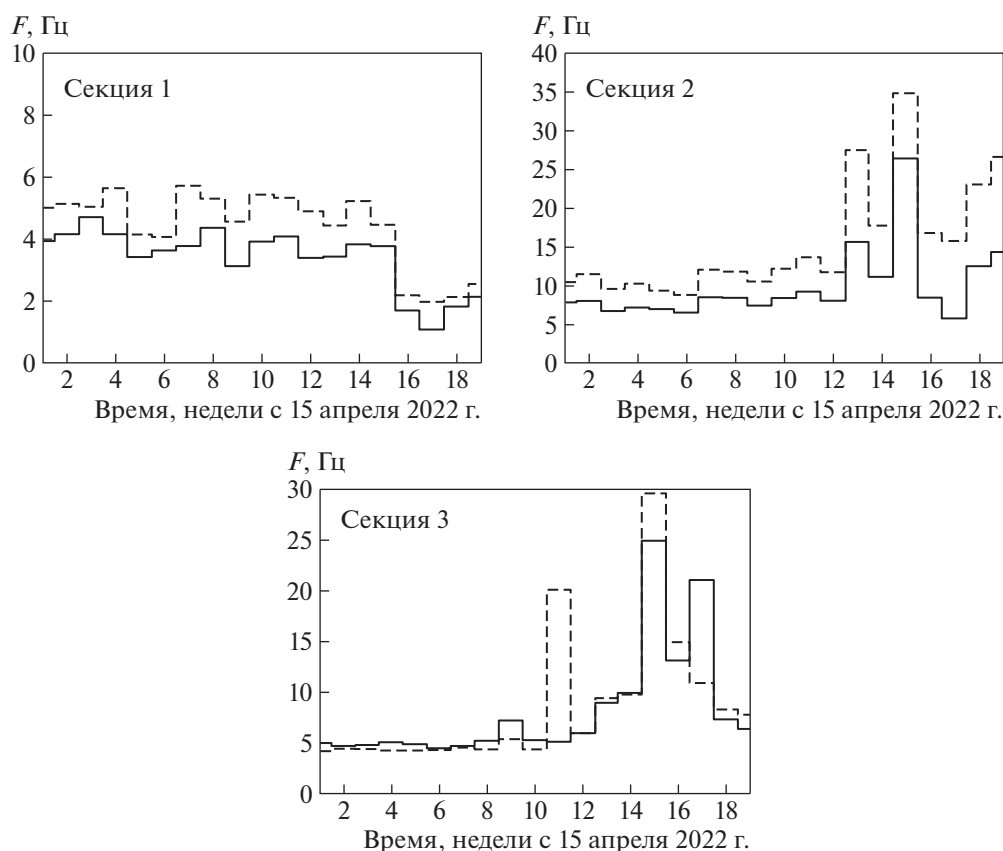


Рис. 7. Частота локальных триггеров, формируемых нижней (№ 1), средней (№ 2) и верхней (№ 3) секциями внешней гирлянды (сплошная линия) и гирлянды 4 кластера 5 (штриховая линия).

РАБОТА ВНЕШНЕЙ ГИРЛЯНДЫ В РЕЖИМЕ РЕГИСТРАЦИИ СОБЫТИЙ

В апреле 2022 г. внешняя гирлянда была введена в эксплуатацию в составе нейтринного телескопа Baikal-GVD в режиме постоянной экспозиции. Анализ полученных с внешней гирлянды экспериментальных данных показал корректность ее работы и не выявил особенностей ее функционирования по сравнению с остальными гирляндами телескопа. В качестве иллюстрации на рис. 7 показана частота формирования локальных триггеров секциями внешней гирлянды по сравнению с гирляндой 4 кластера 5, расположенной в 85 м от нее. Условием формирования триггера секции является совпадение превышающих пороговые значения 1.5 и 4.0 ф.э. сигналов с двух ее соседних оптических модулей во временном окне 100 нс.

Скорость счета локальных триггеров определяется тремя основными процессами: регистрацией атмосферных мюонов, собственными шумами фотоэлектронных умножителей и фоновым свечением воды оз. Байкал. Временная зависимость и абсолютная величина темпов счета, измеренные на двух гирляндах, находятся в хорошем

согласии. На графиках рис. 7 отражены основные особенности функционирования секций оптических модулей телескопа: рост числа срабатывания с уменьшением глубины размещения ОМ, связанный с увеличением вклада фонового свечения воды; стабильное поведение скорости счета в весенне-зимний период и его значительные флуктуации в летний и осенний сезоны, обусловленные переносом светящихся органических масс течениями озера (хемоллюминесценция). В период нестабильного светового фона озера темп счета секций может достигать нескольких десятков герц. Это приводит к повышению частоты фоновых срабатываний кластера до уровня, превышающего возможности системы передачи данных. Поэтому, во избежание потери данных, в этот период пороги регистрации каналов искусственно поднимаются на 20–30%. Эффект повышения порогов регистрации в августе 2022 г. можно наблюдать на рис. 7 как снижение темпа счета *запросов* для первых (нижних) секций гирлянд.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в статье расчеты показывают значимое увеличение эффективности работы ре-

гистрирующей системы Baikal-GVD при установке внешней гирлянды между кластерами телескопа. Для конфигурации из трех кластеров (24 гирлянды) добавление одной внешней гирлянды обеспечивает увеличение количества регистрируемых событий на 10% для каскадных ливней с энергией больше 1 ТэВ и на 24% для каскадных ливней с энергией больше 100 ТэВ. Техническая реализация проекта по установке внешних гирлянд в геометрических центрах каждой тройки кластеров не представляет принципиальных затруднений. Система сбора данных, глубоководная кабельная инфраструктура и система электропитания кластера могут быть достаточно просто адаптированы для обслуживания девяти гирлянд (включая одну внешнюю) вместо восьми.

Натурные испытания внешней гирлянды показали корректность и надежность функционирования входящей в ее состав аппаратуры и достаточно высокую точность ее временной калибровки относительно окружающих гирлянд (~2.5 нс). Точность синхронизации внешней гирлянды с кластерами телескопа составила ~2 нс, что совпадает с точностью синхронизации базовых гирлянд телескопа. Использование светодиодной калибровочной системы внешней гирлянды позволило провести относительную временную калибровку кластеров, что обеспечивает дублирование лазерной калибровочной системы телескопа, которая в настоящее время используется для этих целей.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 20-02-00400 и № 19-29-11029.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IceCube Collaboration. *Aartsen M.G. et al.* // JINST. 2017. V. 12. P. 03012.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/03/P03012>
2. KM3NeT Collaboration. *Adrian-Martinez S. et al.* // J. Phys. 2016. V. G 43. P. 084001.
<https://doi.org/10.1088/0954-3899/43/8/084001>
3. Baikal-GVD Collaboration. *Avrorin A.D. et al.* // Nucl. and Part. Phys. Proc. 2016. V. 273. P. 314.
<https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2015.09.044>
4. Baikal-GVD Collaboration. *Avrorin A.D. et al.* // EPJ Web of Conf. 2016. V. 116. P. 01003.
<https://doi.org/10.1051/epjconf/201611601003>
5. IceCube Collaboration. *Aartsen M.G. et al.* // Phys. Rev. 2015. V. D 91. P. 022001.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.91.022001>
6. Baikal-GVD Collaboration. *Avrorin A.D. et al.* // EPJ Web of Conf. 2016. V. 116. P. 5004.
<https://doi.org/10.1051/epjconf/201611605004>
7. Baikal-GVD Collaboration. *Avrorin A.D. et al.* // PoS ICRC2019. 2019. P. 1012.
<https://doi.org/10.22323/1.358.1012>
8. *Авrorин А.В., Авrorин А.Д., Айнутдинов В.М., Ван-наш Р., Бардăcovă З., Белоланников И.А., Бруданин В.Б., Буднев Н.М., Гафаров А.Р., Голубков К.В., Горшков Н.С., Гресъ Т.И., Dvornický R., Домогацкий Г.В., Дорошенко А.А. et al.* // ПТЭ. 2020. № 4. С. 120.
<https://doi.org/10.31857/S0032816220040102>
9. Baikal-GVD Collaboration. *Allakhverdyan V.A. et al.* // PoS ICRC2021. 2021. P. 1066.
<https://doi.org/10.22323/1.395.1066>
10. *Serrano J., Alvarez P., Cattin M., Garcia Cota E., Lewis J., Moreira P., Wlostowski T., Gaderer G., Loschmidt P., Dedic J., Bar R., Fleck T., Kreider M., Prados C., Rauch S.* // Proc. of ICALEPS 2009. Kobe, Japan, 2009. TUC004.
<http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/icaleps2009/papers/tuc004.pdf> ISBN 978-4-9905391-0-8