

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 539.123

ГЛУБОКОВОДНЫЙ НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП В ОЗЕРЕ БАЙКАЛ

© 2021 г. А. В. Аврорин<sup>а</sup>, А. Д. Аврорин<sup>а</sup>, В. М. Айнутдинов<sup>а, \*</sup>, В. А. Аллахвердян<sup>б</sup>, П. Банаш<sup>с</sup>,  
З. Бардачова<sup>д</sup>, И. А. Белолоптиков<sup>б</sup>, И. В. Борина<sup>б</sup>, В. Б. Бруданин<sup>б</sup>, Н. М. Буднев<sup>е</sup>,  
А. Р. Гафаров<sup>е</sup>, К. В. Голубков<sup>а</sup>, Н. С. Горшков<sup>б</sup>, Т. И. Гресь<sup>е</sup>, Р. Дворнишки<sup>б, д</sup>,  
Ж.-А. М. Джилкибаев<sup>а</sup>, В. Я. Дик<sup>б</sup>, Г. В. Домогацкий<sup>а</sup>, А. А. Дорошенко<sup>а</sup>, А. Н. Дячок<sup>е</sup>,  
Т. В. Елжов<sup>б</sup>, Д. Н. Заборов<sup>а</sup>, М. С. Катулин<sup>б</sup>, К. Г. Кебкал<sup>с</sup>, О. Г. Кебкал<sup>с</sup>, В. А. Кожин<sup>г</sup>,  
М. М. Колбин<sup>б</sup>, К. В. Конищев<sup>б</sup>, К. А. Копански<sup>г</sup>, А. В. Коробченко<sup>б</sup>, А. П. Кошечкин<sup>а</sup>,  
М. В. Круглов<sup>б</sup>, М. К. Крюков<sup>а</sup>, В. Ф. Кулепов<sup>д</sup>, Па. Малецки<sup>г</sup>, Ю. М. Малышкин<sup>б</sup>,  
М. Б. Миленин<sup>а</sup>, Р. Р. Миргазов<sup>е</sup>, В. Назари<sup>б</sup>, Д. В. Наумов<sup>б</sup>, В. Нога<sup>г</sup>, Д. П. Петухов<sup>а</sup>,  
Е. Н. Плисковский<sup>б</sup>, М. И. Розанов<sup>и</sup>, В. Д. Рушай<sup>б</sup>, Е. В. Рябов<sup>е</sup>, Г. Б. Сафронов<sup>а</sup>,  
А. Э. Сиренко<sup>б</sup>, А. В. Скурихин<sup>г</sup>, А. Г. Соловьев<sup>б</sup>, М. Н. Сороковиков<sup>б</sup>,  
А. П. Стромаков<sup>а</sup>, О. В. Суворова<sup>а</sup>, Е. О. Сушенок<sup>б</sup>, В. А. Таболенко<sup>е</sup>,  
Б. А. Тарашанский<sup>е</sup>, Л. Файт<sup>г</sup>, С. В. Фиалковский<sup>д</sup>, Е. В. Храмов<sup>б</sup>, Б. А. Шайбонов<sup>б</sup>,  
М. Д. Шелепов<sup>а</sup>, Ф. Шимковиц<sup>б, д, j</sup>, И. Штекл<sup>г</sup>, Э. Эцкерова<sup>д</sup>, Ю. В. Яблокова<sup>б</sup>, С. А. Яковлев<sup>с</sup>

<sup>а</sup>Институт ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия

<sup>б</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл., 141980 Россия

<sup>с</sup>EvoLogics GmbH, Берлин, 13355 Германия

<sup>д</sup>Comenius University, Братислава, 81499 Словакия

<sup>е</sup>Иркутский государственный университет, Иркутск, 664003 Россия

<sup>г</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ, Москва, 119991 Россия

<sup>г</sup>Institute of Nuclear Physics of Polish Academy of Sciences (IFJ PAN), Krakow, 60179 Poland

<sup>д</sup>Нижегородский государственный технический университет, Нижний Новгород, 603950 Россия

<sup>и</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, 190008 Россия

<sup>j</sup>Czech Technical University, Prague, 16000 Czech Republic

\*E-mail: aynutdin@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.06.2021 г.

После доработки 14.07.2021 г.

Принята к публикации 15.07.2021 г.

В озере Байкал строится глубоководный нейтринный телескоп Baikal-GVD масштаба кубического километра, ориентированный на исследования в области астрофизики и физики элементарных частиц. На этапе развертывания установки 2021 г. эффективный объем детектора составил 0.4 км<sup>3</sup> в задаче регистрации каскадов, генерированных астрофизическими нейтрино высокой энергии. В статье описаны конструкция и основные характеристики системы сбора данных телескопа, рассматриваются вопросы глубоководной инженерии, связанные с развертыванием детектора, и представлен ряд физических результатов, полученных на установке.

**Ключевые слова:** нейтрино, мюоны, нейтринные телескопы, система сбора данных, глубоководная инженерия, Байкал

DOI: 10.56304/S2079562920060081

ВВЕДЕНИЕ

Глубоководные нейтринные телескопы предназначены для исследований высокоэнергетических процессов в астрофизических объектах и во Вселенной в целом с помощью нейтрино высоких энергий. Принцип работы нейтринных телескопов основан на регистрации черенковского излучения вторичных мюонов и каскадных ливней,

образующихся в нейтринных взаимодействиях, пространственной решеткой фотодетекторов — оптических модулей. Мишенью для нейтрино является прозрачная природная среда (вода или лед), что позволяет создавать детекторы масштаба нескольких кубических километров. История Байкальского нейтринного эксперимента начинается в 90-х гг. прошлого века, когда в оз. Байкал было начато строительство глубоководного те-

лескопа HT200, на котором были зарегистрированы первые нейтринные события из нижней полусферы Земли [1]. Успешная работа HT200 на протяжении более 10 лет во многом была обусловлена уникальными разработками в области глубоководной инженерии, которые обеспечили эффективное развертывание и эксплуатацию установки. На основе опыта создания HT200 в 2011 г. было начато проектирование крупномасштабного нейтринного телескопа Baikal-GVD [2]. Телескоп расположен в южной части оз. Байкал. Глубина озера в месте дислокации установки составляет 1366 м. Принципиальным требованием к конструкции телескопа являлась его модульная структура, которая обеспечивает возможность проведения физических исследований уже на ранних стадиях развертывания установки. Первый полномасштабный модуль телескопа (кластер фотодетекторов) был включен в режиме постоянной экспозиции в 2016 г., а весной 2021 г. было введено в эксплуатацию восемь аналогичных кластеров с суммарным эффективным объемом  $0.4 \text{ км}^3$  в задаче регистрации каскадов, генерируемых астрофизическими нейтрино высокой энергии. В настоящее время Baikal-GVD вместе с IceCube [3], KM3NeT [4] и Antares [5] формируют мировую сеть нейтринных телескопов GNN (Global Neutrino Network). Совместная работа Baikal-GVD с другими нейтринными телескопами позволяет осуществлять непрерывный мониторинг нейтринного потока по всей небесной сфере.

Время строительства крупномасштабных нейтринных телескопов в целом, и Baikal-GVD в частности, составляет несколько лет. На основании первого опыта эксплуатации установок на этапе их строительства проводится частичная модернизация конструктивных элементов и электронных систем в целях повышения надежности и эффективности работы детектора. Целью данной статьи является описание окончательного варианта конструкции и результатов реализации основных систем детектора. В статье также рассматриваются инженерные решения, связанные с технологией развертывания и эксплуатации установки и представлен ряд полученных к настоящему времени физических результатов.

## 1. СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Регистрация черенковского излучения в установке Baikal-GVD осуществляется оптическими модулями (ОМ). Такое название фотодетекторов стало общепринятым для нейтринных телескопов. Конструкция оптического модуля Baikal-GVD [6] представлена на рис. 1. В качестве светочувствительного элемента используется фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) R7081-100 с диаметром фотокатода 10 дюймов. Область спектральной чув-

ствительности фотокатода 300–650 нм, максимальная квантовая эффективность около 35%. ФЭУ размещается в сферическом стеклянном глубоководном корпусе VITROVEX из боросиликатного стекла диаметром 42 см. Оптический контакт между фотокатодом и стеклянным корпусом обеспечивается при помощи силиконового двухкомпонентного геля SilGel 612A/B. Для уменьшения влияния магнитного поля Земли на работу фотоэлектронного умножителя используется защитный экран (сетка) из отожженного пермаллоя. Блок электроники оптического модуля монтируется непосредственно на цоколь ФЭУ. В состав электроники ОМ входят источник высоковольтного напряжения TRACO POWER PHV12-2.0K2500P, делитель напряжения с сопротивлением 18 МОм, усилитель сигналов ФЭУ, модуль управления (контроллер ОМ) и светодиодная калибровочная система.

Методика развертывания телескопа со льда озера Байкал в значительной степени определяет конфигурацию системы регистрации черенковского излучения установки. Оптические модули крепятся на несущие конструкции (буйрепы), закрепленные якорями на дне озера, формируя гирлянды. Гирлянды сгруппированы в кластеры. Оптимизация конфигурации кластеров оптических модулей с точки зрения обеспечения максимальной эффективной площади регистрации астрофизических нейтрино была выполнена для длины поглощения байкальской воды 22 м [7]. Оптимизированный кластер включает в свой состав центральную гирлянду и семь гирлянд, равномерно расположенных по окружности радиусом 60 м (см. рис. 1). Каждая гирлянда состоит из 36 оптических модулей размещенных с шагом 15 м на глубинах от 750 до 1275 м. ОМ ориентированы фотокатодами вниз, что повышает эффективность регистрации событий из нижней полусферы и предотвращает потери излучения из-за накопления слоя осадков в верхней части стеклянного корпуса. В период с 2016 по 2021 г. в оз. Байкал введено в эксплуатацию восемь таких кластеров, содержащих в общей сложности 2304 ОМ.

На рис. 1 также показано размещение станций с калибровочными лазерными источниками света (см. разд. 2.2) и экспериментальных гирлянд, на базе которых проводятся испытания модернизированных узлов детектора перед их включением в рабочую конфигурацию телескопа.

## 2. СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ

Работы по полномасштабному развертыванию телескопа начались в 2015 г. С этого момента конфигурация системы сбора данных в целом оставалась неизменной. Однако, опыт эксплуатации установки показал необходимость частичной модернизации отдельных узлов детектора. В частности, в целях повышения надежности и эффектив-

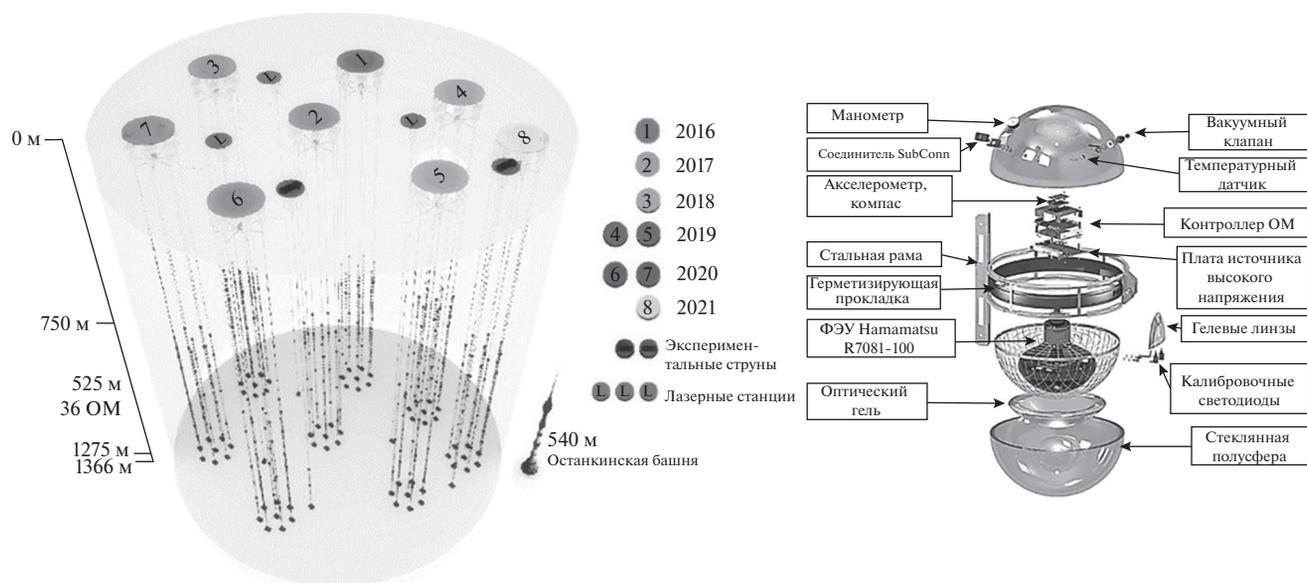


Рис. 1. Восемь кластеров Baikal-GVD в конфигурации 2021 г. (слева) и схема конструкции оптического модуля Baikal-GVD (справа).

ности его работы, были внесены изменения в систему управления электропитанием установки, модернизированы системы калибровки и позиционирования, оптимизированы глубоководные кабельные коммуникации. В данной работе представлена актуальный вариант системы сбора данных, принятый в настоящее время за основу при развертывании телескопа.

### 2.1. Организация системы сбора данных

Организация системы сбора данных (ССД) определяется конфигурацией телескопа и формируется из электронных модулей управления кластерами, гирляндами и секциями оптических модулей [8]. Модули управления размещаются в таких же глубоководных корпусах, как и ОМ. Секция является базовым блоком ССД, в состав которого входит 12 ОМ, 2 акустических модема (АМ) системы позиционирования и модуль управления секцией (см. рис. 2). Оптические модули и акустические модемы подключаются к центральному электронному модулю, функциями которого являются управление, сбор и первичная обработка данных секции. Подключение осуществляется индивидуальными кабелями длиной около 90 метров. Электропитание ОМ и АМ обеспечивает 16-канальный блок коммутации постоянного напряжения: 12 каналов обслуживают оптические модули (12 В), два канала зарезервированы для расширения системы. Помимо электропитания ОМ, функцией блока коммутации является управление режимами работы оптических модулей и монито-

ринг их параметров. Управление осуществляется по шести переключаемым каналам шины RS-485: каждый канал обслуживает два ОМ. Для управления работой акустических модемов используется преобразователь Ethernet: COM Server NPort IA 5250.

Обработка аналоговых сигналов, поступающих с ФЭУ оптических модулей, осуществляется в блоке сбора данных *Master*. В состав блока входит 12-канальный АЦП с частотой дискретизации 200 МГц, который обеспечивает непрерывное сканирование сигналов и запись информации в циклический буфер (временную дорожку АЦП длительностью 30 мкс). Обработка данных – формирование *запроса* (локального триггера) секции и кадра события – производится на уровне ПЛИС (Xilinx Spartan 6). Условие формирования *запроса* секции может являться либо совпадение сигналов с двух соседних ОМ (базовый режим работы), либо мажоритарные совпадения сигналов ОМ (используется в тестовых целях). Формирование кадра события длительностью 5 мкс инициирует *общий триггер* кластера. Положение кадра на дорожке выбирается таким образом, чтобы импульсы, инициировавшие *запрос* секции, находились в середине кадра. Передача временного кадра осуществляется по каналу Ethernet. Для увеличения пропускной способности канала данные фильтруются – передаются только те части временного кадра, которые содержат сигналы, превышающие заданный порог. Передача данных из модуля секции осуществляется через IEX-402-SHDSL Ethernet Extender, позволяющий удлинять канал передачи

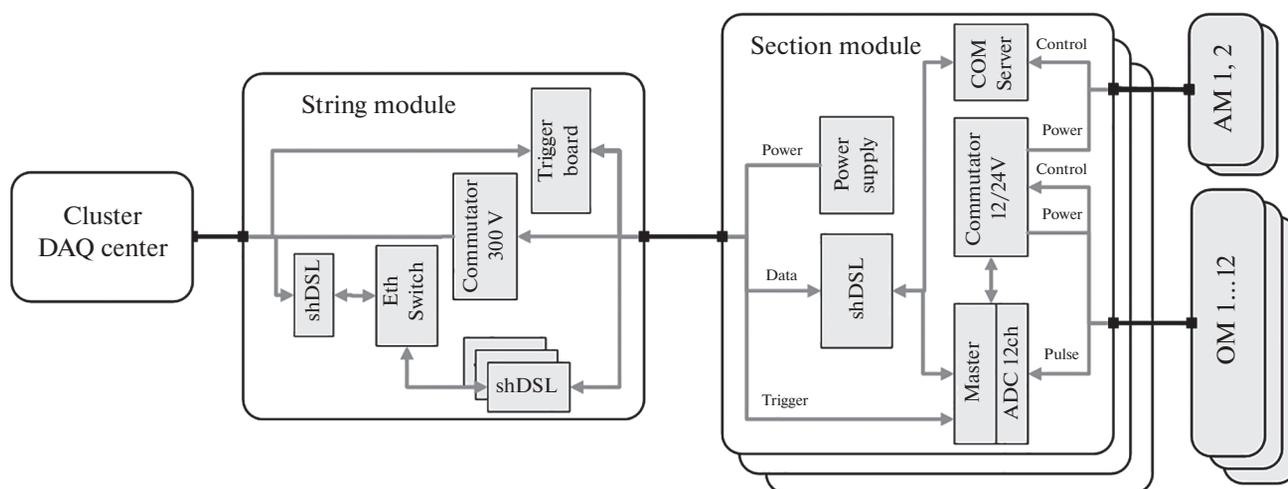


Рис. 2. Схема организации ССД кластера Baikal GVD.

данных до нескольких километров при скорости передачи до 5.7 Мбит/с.

Объединение трех секций в составе гирлянды осуществляется на уровне модуля управления гирляндой. Каждая секция подключается к модулю гирлянды по отдельному кабелю (длины кабелей 90, 270 и 450 м для верхней, средней и нижней секций соответственно). Для электропитания секций в модуле гирлянды установлен 12-канальный коммутатор напряжения 300 Вольт постоянного тока. Шесть каналов используется для электропитания 3-х секций (к оптическим модулям и блокам управления каждой секций электропитание подводится через отдельные каналы коммутатора). Шесть оставшихся каналов используются в качестве резервных. Переключением каналов управляет модуль дискретного 16-канального вывода ICP DAS I-7045. Для мониторинга выходного напряжения на каналах коммутатора используется модуль аналогового ввода ICP DAS I-7017Z-G. Локальные триггера, поступающие от трех секций, объединяются на триггерной плате формируя сигнал *запроса* гирлянды. Данные секций поступают на Ethernet коммутатор через три удлинителя линии Ethernet IEX-402-SHDSL и передаются в центр сбора данных кластера через аналогичный удлинитель линии.

Центр кластера обеспечивает электропитание восьми гирлянд через два коммутатора 300 Вольт, аналогичные установленным в модулях гирлянд: основной и резервный (система управления электропитания гирлянд полностью продублирована). Триггерная система центра кластера в целях унификации выполнена на основе блока *Master*. Сигналы *запрос* гирлянд поступают на *Master*, который формирует *общий триггер* кластера. В настоящее время триггер вырабатывается для каждого поступившего сигнала *запрос*. В то же время преду-

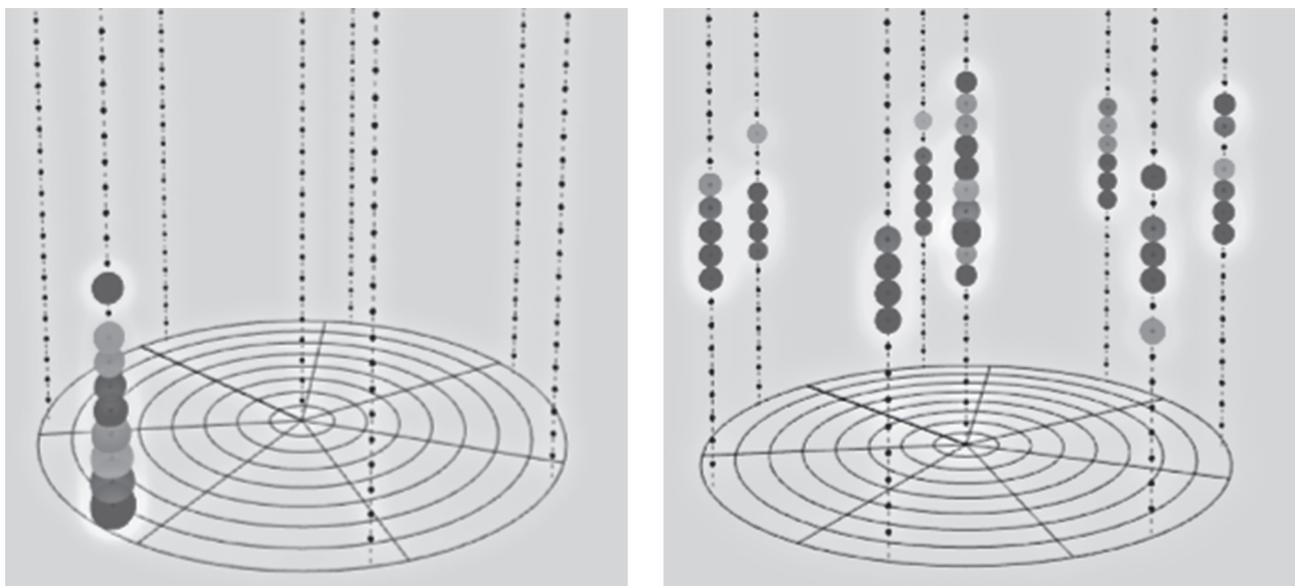
смотрена возможность работы и в режиме совпадений *запросов* от двух и более гирлянд. *Общий триггер* синхронизует работу всех секций кластера и инициирует считывание данных – кадров секций.

Данные от гирлянд поступают в центральный Ethernet коммутатор через удлинители IEX-402-SHDSL и затем транслируются в Береговой центр сбора данных по оптоволоконной линии длиной около 6 км (скорость передачи 1 Гбит/с). Данные архивируются на серверах Береговой станции. Дальнейшая передача данных осуществляется по радиоканалу (250 Мбит/с) в г. Байкальск, где поддерживается постоянная интернет-связь с Дубной, Иркутском и Москвой.

## 2.2. Калибровочная система

Калибровка Baikal-GVD [9] заключается в измерении относительных временных задержек сигналов на каналах установки при помощи калибровочных источников света (временная калибровка) и измерении амплитудных калибровочных коэффициентов. Для временной калибровки используются источники света, разработанные на основе светодиодов Kingbright L7113 с длиной волны в максимуме излучения 470 нм и длительностью импульса ~5 нс. Интенсивность их излучения регулируется от единиц фотонов до  $10^8$  на вспышку. Световой импульс формируется в конусе с раствором  $15^\circ$  и может быть зарегистрирован оптическим модулем на расстояниях до 100 м от источника излучения.

В каждом оптическом модуле установлено два калибровочных источника, со светодиодами, ориентированными в верхнем направлении. Кроме того, в 12 ОМ кластера, размещенных на центральной и двух периферийных гирляндах, дополнительно установлены по две матрицы из 5 светодиодных



**Рис. 3.** Примеры калибровочных событий от светодиода нижнего оптического модуля секции (слева) и матрицы светодиодов, установленной на центральной гирлянде (справа).

источников, ориентированных горизонтально и расположенных равномерно по окружности. На рис. 3 представлены примеры событий, инициированных вспышками калибровочного светодиода и матрицы светодиодов. Светодиоды оптических модулей позволяют провести калибровку временных задержек каналов в пределах одной гирлянды. Светодиодные матрицы обеспечивают относительную временную калибровку каналов разных гирлянд. Точность временной калибровки составляет величину 2–3 нс. Для амплитудной калибровки каналов установки измеряются однофотозлектронные распределения ФЭУ в режиме регистрации фонового свечения воды оз. Байкал.

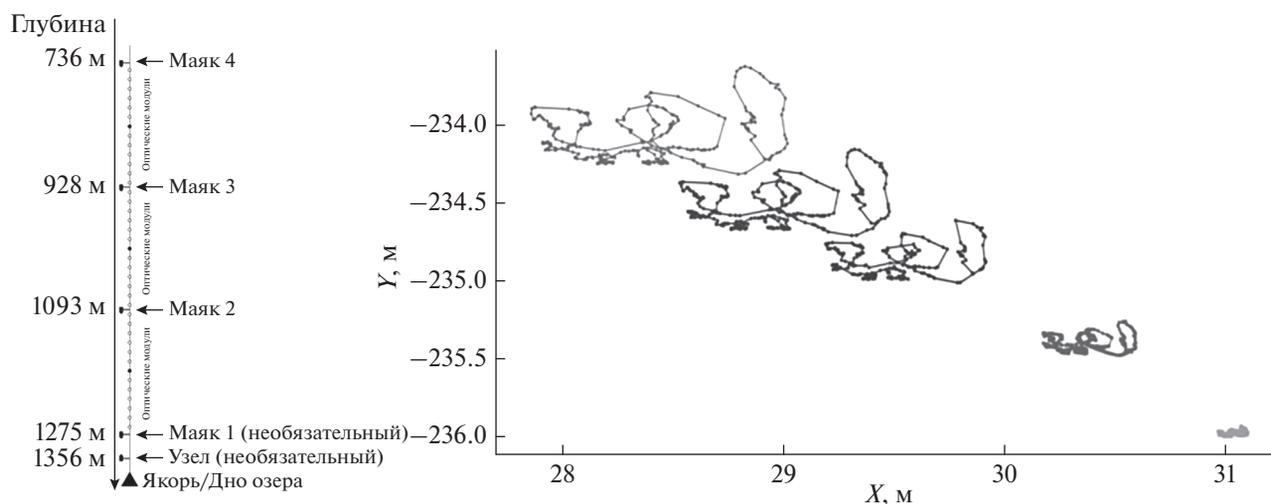
Для относительной временной калибровки кластеров используются лазерные источники света. Лазеры излучают на длине волны 532 нм, длительность вспышки составляет около 1 нс, максимальная интенсивность излучения около  $10^{15}$  фотонов. Лазерный луч через световод вводится в диффузный рассеиватель, который выступает в качестве точечного квази-изотропного источника света. Лазеры монтируются на буйрепах, формируя лазерные станции. В штатной конфигурации на одной гирлянде устанавливаются два лазера на разных горизонтах. Лазерные станции размещаются между кластерами (см. рис. 1) и обеспечивают взаимную калибровку группы из 3–4 кластеров. Помимо функции калибровки, лазеры используются для мониторинга параметров водной среды озера Байкал (поглощения и рассеяния) в области установки.

Для реконструкции физических событий помимо калибровочной информации необходимы данные о координатах оптических модулей в мо-

мент регистрации событий. Гирлянды с оптическими модулями имеют положительную плавучесть и крепятся при помощи якорей к дну озера. Под воздействием течений они могут отклоняться от вертикали, что приводит к тому, что положение оптических модулей изменяется с течением времени. Для определения координат оптических модулей используется акустическая система позиционирования, состоящая из набора акустических модемов (АМ), оснащенных гидрофонами, излучающими и принимающими сигналы в ультразвуковом диапазоне [10]. На каждой гирлянде размещаются 4 акустических модема: Маяк 1, ..., Маяк 4 (см. рис. 4), точность измерения координат которых составляет 15–20 см. Интерполяция координат АМ позволяет определить положение оптических модулей, расположенных между ними, с точностью 25–30 см. В правой части рис. 4 показан пример перемещений акустических модемов, расположенных на четырех горизонтах, в течение 5 дней работы установки.

### 2.3. Характеристики системы сбора данных

Основные характеристики системы сбора данных – пороги регистрации, точность измерения времени и заряда импульсов, точность синхронизации работы каналов установки – определяются пропускной способностью линий передач информации и тактовой частотой электронных блоков, отвечающих за обработку данных. Как указывалось в разд. 2.1, пропускная способность линий передачи гирлянд ограничивается скоростью работы удлинителей каналов Ethernet и составля-



**Рис. 4.** Положение акустических модемов на гирлянде и пример траекторий их перемещений (измерения с 1-го по 5-ое июля 2019 г.).

ет величину 5.7 Мбит/с. В каждом временном кадре, формируемом секциями оптических модулей, содержится информация о форме импульсов со всех оптических модулей. Стабильная передача этой информации на береговую станцию телескопа возможна при частоте формирования триггера каждого кластера, не превышающей 200 Гц. Это накладывает ограничение на триггерные пороги каналов. В настоящее время в качестве базового триггера кластера используется совпадение сигналов любой пары соседних оптических модулей секций во временном окне 100 нс. Величина триггерных порогов каналов устанавливается на уровне  $\sim 1.5$  ф.э. и  $\sim 4$  ф.э., что соответствует частоте формирования триггера 30–150 Гц в зависимости от световой активности озера Байкал.

Точность измерения времени и заряда импульсов зависит от характеристик используемого АЦП и способа оценки величины этих параметров. Для 12-разрядного АЦП с частотой дискретизации 200 МГц точность определения положения сигнала на дорожке составляет менее 0.5 нс, что на порядок превышает дискретность времени измерения. Такая точность достигается за счет использования интерполяции формы импульсов.

Система временной синхронизации Baikal-GVD обеспечивает работу всех каналов установки в условиях единой шкалы времени. Принцип работы системы основан на синхронизации каналов в пределах одного кластера на базе общего триггерного сигнала для всех секций и измерении времени формирования триггера используя единую тактовую частоту для всех часов кластеров установки. Точность синхронизации каналов одного кластера при тактовой частоте управляющей электроники секций 200 МГц составляет величину  $\sim 2$  нс. Точность синхронизации каналов на разных кластерах  $\sim 4$  нс.

### 3. РАЗВЕРТЫВАНИЕ ДЕТЕКТОРА

Развертывание крупномасштабных нейтринных телескопов представляет собой сложную инженерную задачу, решение которой требует разработки специальных методов и применения уникальных технических решений. Методика развертывания определяется местом дислокации телескопа. Так, например, для монтажа оптических модулей детектора IceCube на Южном полюсе используется уникальная технология бурения многокилометровых вертикальных шахт во льду. Развертывания гирлянд регистрирующей системы KM3NeT в Средиземном море осуществляется со специально оборудованных судов. Следует отметить, что технологии, применяемые в IceCube и KM3NeT не предусматривают возможность демонтажа аппаратуры для проведения профилактических работ.

Все монтажные работы, связанные с наращиванием и техническим обслуживанием подводного оборудования Байкальского нейтринного телескопа, ведутся с ледового покрова озера в период зимне-весенних экспедиций, когда толщина льда достаточна для долговременного пребывания тяжелой техники. Период проведения ледовых работ зависит от ледовой обстановки и составляет, как правило, от 40 до 50 дней: с середины февраля до начала апреля. Наличие стабильной ледовой платформы на поверхности озера принципиально отличает Baikal-GVD от других нейтринных телескопов, поскольку он позволяет использовать существенно более простые технические средства и технологии и обеспечивает возможность проведения профилактических работ на установке.



Рис. 5. Вид ледового лагеря (слева) и спускоподъемное устройство СПУ (справа).

### 3.1. Инфраструктура ледового лагеря

Ежегодные подготовительные работы к монтажу детектора включают анализ сформировавшегося ледового ландшафта и разметку ледового лагеря (см. рис. 5), рабочая площадка которого в настоящее время составляет около 1 км<sup>2</sup>. Разметка ледового лагеря производится при помощи GPS-навигаторов и обеспечивает фиксацию на поверхности льда с точностью около 5 см точек расположения ранее установленных и вновь планируемых притопленных буйковых станций (ПБС), на которые монтируется глубоководная аппаратура гирлянд телескопа. В местах дислокации ПБС с помощью специализированных устройств на основе цепных бензопил подготавливаются так называемые *майны* – монтажные отверстия во льду размером 1.5 × 1.5 м с защитными ограждениями. На подготовленные *майны* выставляются специализированные мобильные спускоподъемные устройства (СПУ), с которых производится монтаж (или демонтаж) гирлянд, и устанавливаются передвижные утепленных фургоны КУНГ для тестирования монтируемых на гирлянды глубоководных модулей системы регистрации и управления телескопа. Для энергоснабжения ледового лагеря используются несколько дизель-генераторных установок (ДГУ) мощностью от 20 до 60 кВт. На территории ледового лагеря организована устойчивая Wi-Fi радиосвязь.

Все элементы инфраструктуры ледового лагеря – СПУ, КУНГ, ДГУ, складские модули, каюткомпания – оборудованы санными шасси, позволяющими перемещать их по торосистому льду озера с береговой площадки сезонного хранения. Для буксировки используются легкие гусеничные тягачи ГАЗ (Ирбис) и колесный транспорт на базе ГАЗ-66. Передвижения личного состава экспеди-

ции производятся на полноприводных а/м-фургонах УАЗ-452.

### 3.2. Технология развертывания установки

Отличительной чертой Байкальского нейтринного телескопа является, так называемое, “верхнее” подключение всех составляющих его гирлянд. Связывающие их перемишки представляют собой разгруженные до нейтральной плавучести, механически усиленные кабели длиной 60–100 м, вывешенные под поверхность озера на глубине около 30 м. Для вывешивания перемишек используется подводный дрон, оснащенный видеокамерой, который позволяет проводить подо льдом между *майнами* репшнур для последующего протягивания силового кабеля. Преимуществом архитектуры детектора с “верхними” связями является простота технологических операций подключения гирлянд, высокая ремонтпригодность и возможность реконфигурации установки: изменения плотности расположения и количества регистрирующих модулей на гирлянде, а также переноса гирлянд подо льдом без их демонтажа.

Основными техническими средствами развертывания телескопа являются СПУ, сконструированные на основе каротажных подъемников типа ПКН-3.5 с электрическим приводом, которые установлены на санные платформы, оборудованные стрелой (см. рис. 5). Грузоподъемность СПУ составляет 3 т при высоте стрелы 7 м. В качестве силового агрегата СПУ используется двигатель постоянного тока ДПМ-310М1 в судовом исполнении. Пульт управления реализован на базе автотрансформатора и диодных мостов. Простота и надежность использованных технических решений обеспечивают высокий рабочий ресурс, долговечность и ремонтпригодность СПУ.

Тестирование оборудования гирлянд в процессе монтажа осуществляется без подключения к береговому центру с помощью автономных стенов, размещаемых в передвижных фургонах, что позволяет одновременно вести работы на нескольких кластерах. Помимо этого, во время экспедиционных работ постоянно функционирует специально спроектированная мобильная лаборатория на базе а/м ГАЗ-Соболь, оборудованная, помимо стенов, автономным источником стабилизированного электропитания и системой оперативной связи на базе Wi-Fi и IP-телефонии.

Основными несущими элементами ПБС являются буйреп, якорь и буй. В качестве буйрепа применяется грузонесущий геофизический кабель КГ7 с двух-повивной броней, выполненной из коррозионностойкой стальной проволоки. Для обеспечения точного позиционирования оптических модулей буйреп гирлянды подвергается предварительной обтяжке с помощью вывешивания под рабочей нагрузкой. Кроме того, на него наносится разметка точек крепления глубоководной аппаратуры с точностью  $\sim 0.03\%$ . Как якорь, так и буй являются наборными конструкциями из модульных элементов — стальных грузов массой от 60 до 80 кг и пластмассовых наплавов двух типов с плавучестью 4 и 8 кгс. Это позволяет, в зависимости от планируемого к размещению на гирлянде оборудования, задать необходимое натяжение буйрепа и обеспечить долговременную устойчивость гирлянды в поле глубинных течений водных масс.

Передача информации и снабжение электропитанием гирлянд осуществляется по накладным кабелям, которые крепятся к буйрепам. Они представляют собой герметичные кабельные сборки, оснащенные глубоководными герметичными разъемами. Кабельная сеть имеет древовидную структуру, расходящуюся от центра кластера к гирляндам, секциям и оптическим модулям. Транзитное прохождение кабелей через глубоководные модули полностью исключено для повышения уровня защиты от возможного попадания воды в кабельные коммуникации. Кабели длиной до 100 м монтируются на гирлянду на индивидуальных проволочных катушках. Моторизованное приемно-отдающее устройство кассетного типа позволяет механизировать процесс смотки-намотки кабельного жгута. Для остальных кабелей применяются пассивные буксируемые отдающие устройства.

Отдельной задачей является монтаж кабельных коммуникаций, которые соединяют кластеры с береговой станцией. Длина кабельных коммуникаций составляет 6–8 км в зависимости от места расположения кластеров. Решение этой задачи потребовало разработки уникальных технологий и аппаратуры для резки льда и прокладки кабелей по дну оз. Байкал. Подробное обсуждение этих тех-

нологий заслуживает отдельной статьи и выходит за рамки данной работы. В настоящее время каждый год обеспечивается прокладка двух кабелей, позволяющих подключить два кластера телескопа.

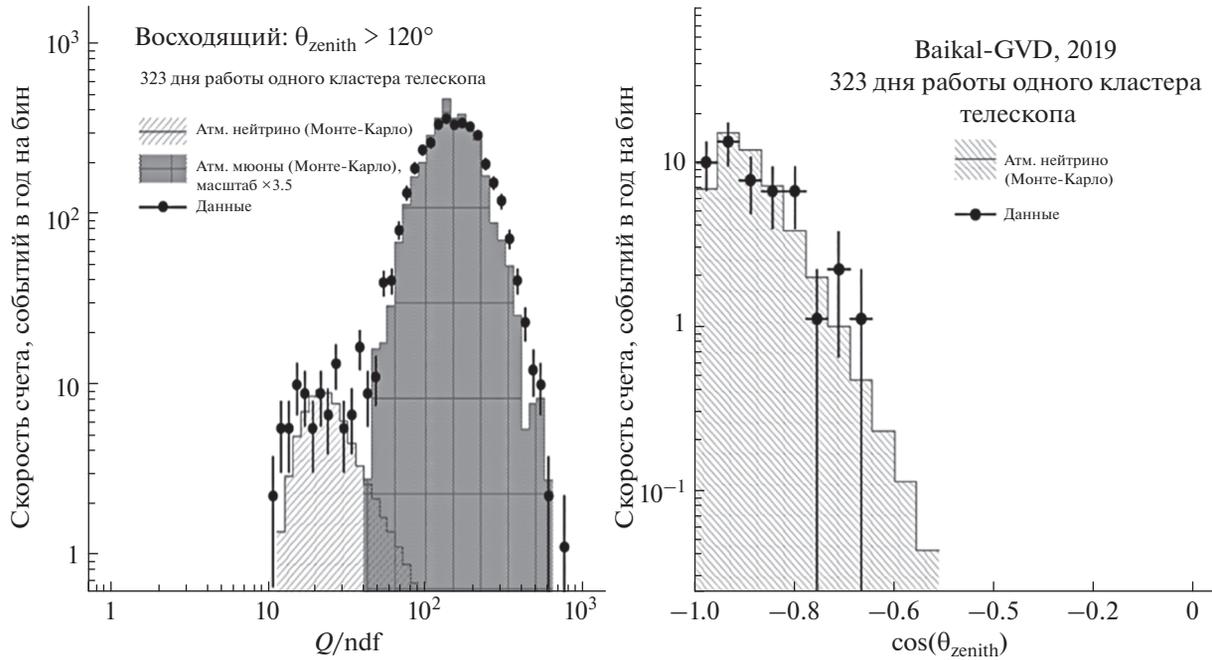
Сборка гирлянды включает в себя ряд жестко регламентированных процедур, включающий в себя монтаж глубоководных модулей на буйреп в заранее размеченных точках подсоединения, подключение к ним кабельных коммуникаций и крепление жгутов кабелей к буйрепу по мере сборки и погружения гирлянды под воду. После установки каждого модуля на буйреп проводится проверка его работоспособности через штатный глубоководный кабель. Процедура тестирования включает в себя контроль надежности работы каналов связи с оптическими модулями и проверку работу секций и гирлянды в целом. Поскольку включение высоковольтного напряжения ФЭУ вблизи поверхности воды приводит к деградации фотокатода, тестирование секций и гирлянды осуществляется при помощи специальных тестовых импульсов, генерируемых контроллерами ОМ. После успешного завершения тестирования гирлянды при помощи ледовых автономных стенов, гирлянда подсоединяется перемычкой к центру кластера и проводится проверка ее работоспособности из береговой станции телескопа. Время монтажа гирлянды телескопа одной бригадой из трех человек составляет 3–4 дня в зависимости от погодных условий на льду озера.

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Начало физических исследований на Baikal-GVD можно отнести к 2016 г., когда был введен в эксплуатацию первый полномасштабный кластер телескопа. Основными направлениями исследований в настоящее время являются: регистрация мюонов из нижней полусферы Земли (трековая мода регистрации), поиск и выделение каскадов, генерированных нейтрино астрофизической природы (каскадная мода регистрации), участие в программе совместного с другими установками поиска источников астрофизических нейтрино (обмен оповещениями о событиях). Регистрация событий на Байкальском нейтринном телескопе осуществляется в режиме постоянной экспозиции.

##### 4.1. Мюоны из нижней полусферы

В трековой моде регистрации в настоящее время отработывается методика выделения и реконструкции нейтринных событий из нижней полусферы Земли. Для определения параметров треков мюонов используется минимизация *функции качества*, представляющей собой нормированную сумму квадратов разницы ожидаемого и измеренного времен регистрации сигналов ОМ, и дополни-



**Рис. 6.** Распределение событий по параметру качества  $Q$  в сравнении с ожидаемым фоном от атмосферных мюонов и сигналом от атмосферных нейтрино (слева). Зенитное распределение выделенных нейтринных событий (справа).

тельного члена, описывающего зависимость зарядов сигналов от расстояния до трека [11]. Сложность выделения мюонов из нижней полусферы связана с высоким уровнем фона от атмосферных мюонов, превышающим сигнал в  $\sim 10^6$  раз для Байкальского телескопа. Основным источником фона являются группы мюонов, которые могут имитировать события снизу. Для подавления фона используется ряд критериев отбора событий. Основным критерием является величина параметра качества  $Q$ , полученного в результате минимизации функции качества.

В качестве пробного набора для анализа были использованы данные, полученные за три месяца 2019 г. (1 апреля–30 июня), эквивалентные 323 дням работы одного кластера телескопа. На рис. 6 представлено распределение реконструированных событий по  $Q$ , которое демонстрирует возможность выделения нейтринных событий из нижней полусферы из фона некорректно реконструированных атмосферных мюонов. Из набора данных было выделено 44 нейтринных событий при ожидаемом значении  $43.6 \pm 6.6$ . Зенитное распределение атмосферных нейтрино, показанное на рис. 6, находится в хорошем согласии с расчетом. Угловая точность реконструкции нейтринных событий составила величину не превышающую  $1^\circ$  при медианной энергии нейтрино 500 ГэВ. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с ожидаемыми.

#### 4.2. Каскады высоких энергий

Baikal-GVD оптимизирован для регистрации событий с высокой энергией, и каскадная мода регистрации в настоящее время является основной в задаче регистрации астрофизических нейтрино. В данной статье представлен анализ данных за три года работы телескопа: с 2018 по 2020, время экспозиции составило 3714 дней в пересчете на один кластер. Для реконструкции каскадов использовалась функция правдоподобия, позволяющая оценить их положение и направление движения иницирующей каскад частицы [11]. На основании полученной информации и распределения зарядов сработавших ОМ восстанавливалась энергия каскада. Точность восстановления энергии улучшается от 30 до 10% с ростом энергии каскада. Угловое разрешение составляет величину  $\sim 4^\circ$  для каскадов с энергией 100 ТэВ.

В результате отбора и реконструкции было выделено 9357 событий с количеством сработавших каналов больше девяти и энергией больше 10 ТэВ. Основную долю событий составляют группы атмосферных мюонов, которые интерпретируются как каскады. Вероятность такой ошибочной идентификации зависит от количества каналов установки, зарегистрировавших событие ( $N_{hit}$ ), и уменьшается до приемлемой величины для  $N_{hit} > 19$ . Распределение событий с  $N_{hit} > 19$  по энергии представлено на рис. 7. Девятнадцать зарегистрированных событий имеют энергию больше 100 ТэВ и направление движения из верхней полусферы Земли.

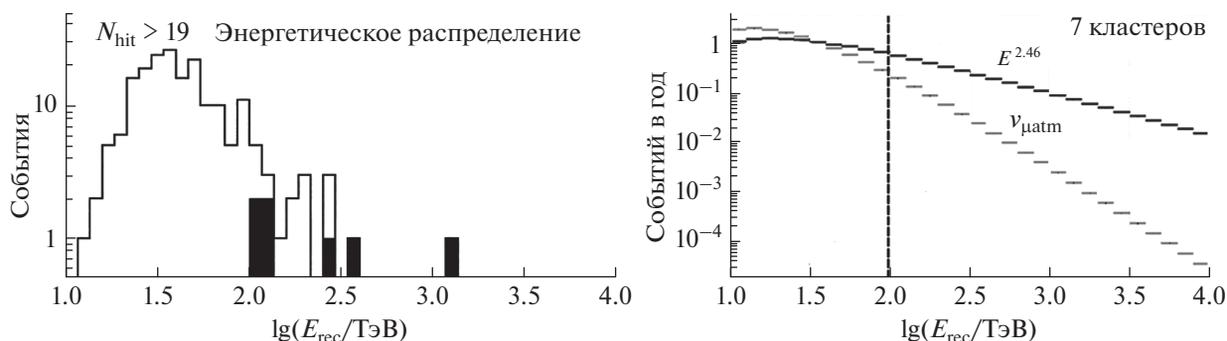


Рис. 7. Распределения по энергии событий с  $N_{hit} > 19$  (слева) и ожидаемого количества событий от астрофизических нейтрино для 7 кластеров телескопа в год (справа).

Дополнительный анализ показал, что 12 событий сопровождаются мюонным треком, что указывает на их генерацию атмосферными мюонами. Семь событий, показанных на рисунке 7 черным цветом, не имеют мюонного сопровождения и могут рассматриваться как кандидаты на астрофизические нейтрино. Ожидаемое распределение по энергии астрофизических событий представлено в правой части рис. 7. В год ожидается примерно 0.4 события для каждого кластера установки.

#### 4.3. Программа совместного поиска источников астрофизических нейтрино

Для идентификации источников астрофизических нейтрино эффективным подходом является поиск коррелированных во времени и по направлению событий одновременно на нескольких установках. Такой подход позволяет значительно снизить требования к уровню фона и, тем самым, повысить эффективность регистрации детекторов. Методика таких исследований основана на оперативном обмене оповещениями о перспективных

с точки зрения поиска корреляций событиях. С декабря 2018 г. Baikal-GVD проводит анализ оповещений, формируемых телескопом ANTARES. В общей сложности было обработано 48 оповещений, среди которых было найдено три кандидата на совпадения с каскадами, зарегистрированными на Baikal-GVD, в пределах углового конуса  $5^\circ$  и временного окна  $\pm 1$  д. В настоящее время проводится анализ этих событий в рамках объединенных рабочих групп телескопов Antares и Baikal-GVD. В результате обработки оповещений от детектора IceCube, начало которой относится к сентябрю 2020 г. [12], были получены ограничения на 90% доверительном уровне на поток нейтрино на уровне  $\sim 2$  ГэВ/см<sup>2</sup> в диапазоне энергий 1 ТэВ–10 ПэВ (см. рис. 8). Расчеты были проведены в предположении о спектре нейтрино вида  $E^{-2}$  и равной доле всех типов нейтрино.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развертывание и эксплуатация глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD успешно осуществляется на протяжении последних шести лет. В настоящее время установка включает в свой состав восемь кластеров с суммарным эффективным объемом регистрации каскадов от астрофизических нейтрино 0.4 км<sup>3</sup> и является крупнейшим телескопом Северного полушария. Успешное развертывание телескопа обеспечивается за счет оптимальной адаптации конфигурации телескопа и методики монтажа установок к специфике проведения работ на оз. Байкал.

За первые годы эксплуатации установки была разработана автоматизированная система обработки экспериментальных данных телескопа, выделены первые кандидаты на астрофизические нейтрино и налажено сотрудничество с другими нейтринными телескопами в рамках совместного поиска источников астрофизических нейтрино. В течение ближайших трех – четырех лет плани-

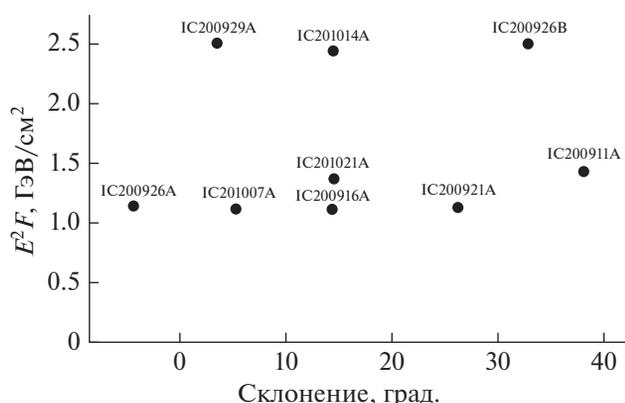


Рис. 8. Ограничения на поток нейтрино, коррелирующие с оповещениями IceCube, полученное на телескопе Baikal-GVD.

руется удвоить эффективный объем Байкальского нейтринного телескопа.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 20-02-00400 и 19-29-11029.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Balkanov V.A. et al. (Baikal Collab.) // Proc. 25th ICRC, Durban. 1997. V. 7. P. 21.*
2. *Avrorin A.D. et al. (Baikal-GVD Collab.) // Nucl. and Part. Phys. Proc. 2016. V. 273. P. 314.*
3. *Aartsen M.G. et al. (IceCube Collab.) // J. Instrum. 2017. V. 12. P. 03012.*
4. *Adrián-Martínez S. et al. (KM3NeT Collab.) // J. Phys. G. 2016. V. 43. P. 084001.*
5. *Ageron M. et al. (Antares Collab.) // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2011. V. 656. P. 11.*
6. *Avrorin A.D. et al. (Baikal-GVD Collab.) // EPJ Web Conf. 2016. V. 116. P. 01003.*
7. *Balkanov V.A. et al. (Baikal Collab.) // Appl. Opt. 1999. V. 38. P. 6818.*
8. *Avrorin A.D. et al. (Baikal-GVD Collab.) // EPJ Web Conf. 2016. V. 116. P. 5004.*
9. *Avrorin A.D. et al. (Baikal-GVD Collab.) // EPJ Web Conf. 2019. V. 207. P. 07003.*
10. *Avrorin A.D. et al. (Baikal-GVD Collab.) // PoS (ICRC2019). 2019. P. 1012.*
11. *Avrorin A.D. et al. (Baikal-GVD Collab.) // PoS (ICRC2019). 2019. P. 0873.*
12. *Avrorin A.D. et al. (Baikal-GVD Collab.) // PoS (ICRC2019). 2019. P. 1013.*

## Deep-Water Neutrino Telescope in Lake Baikal

A. V. Avrorin<sup>1</sup>, A. D. Avrorin<sup>1</sup>, V. M. Aynutdinov<sup>1,\*</sup>, V. A. Allakhverdyan<sup>2</sup>, R. Bannasch<sup>3</sup>, Z. Bardačová<sup>4</sup>, I. A. Belolaptikov<sup>2</sup>, I. V. Borina<sup>2</sup>, **V. B. Brudanin**<sup>2</sup>, N. M. Budnev<sup>5</sup>, A. R. Gafarov<sup>5</sup>, K. V. Golubkov<sup>1</sup>, N. S. Gorshkov<sup>2</sup>, T. I. Gress<sup>5</sup>, R. Dvornický<sup>2,4</sup>, Zh.-A. M. Dzhilkibaev<sup>1</sup>, V. Y. Dik<sup>2</sup>, G. V. Domogatsky<sup>1</sup>, A. A. Doroshenko<sup>1</sup>, A. N. Dyachok<sup>5</sup>, T. V. Elzhov<sup>2</sup>, D. N. Zaborov<sup>1</sup>, M. S. Katulin<sup>2</sup>, K. G. Kebkal<sup>3</sup>, O. G. Kebkal<sup>3</sup>, V. A. Kozhin<sup>6</sup>, M. M. Kolbin<sup>2</sup>, K. V. Konischev<sup>2</sup>, K. A. Kopański<sup>7</sup>, A. V. Korobchenko<sup>2</sup>, A. P. Koshechkin<sup>1</sup>, M. V. Kruglov<sup>2</sup>, M. K. Kryukov<sup>1</sup>, V. F. Kulepov<sup>8</sup>, Pa. Malecki<sup>7</sup>, Y. M. Malyshkin<sup>2</sup>, M. B. Milenin<sup>1</sup>, R. R. Mirgazov<sup>5</sup>, V. Nazari<sup>2</sup>, D. V. Naumov<sup>2</sup>, W. Noga<sup>7</sup>, D. P. Petukhov<sup>1</sup>, E. N. Pliskovsky<sup>2</sup>, M. I. Rozanov<sup>9</sup>, V. D. Rushay<sup>2</sup>, E. V. Ryabov<sup>5</sup>, G. B. Safronov<sup>1</sup>, A. E. Sirenko<sup>2</sup>, A. V. Skurikhin<sup>6</sup>, A. G. Solovjev<sup>2</sup>, M. N. Sorokovikov<sup>2</sup>, A. P. Stromakov<sup>1</sup>, O. V. Suvorova<sup>1</sup>, E. O. Sushenok<sup>2</sup>, V. A. Tabolenko<sup>5</sup>, B. A. Tarashansky<sup>5</sup>, L. Fajt<sup>10</sup>, **S. V. Fialkovsky**<sup>8</sup>, E. V. Khranov<sup>2</sup>, B. A. Shaybonov<sup>2</sup>, M. D. Shelepov<sup>1</sup>, F. Šimkovic<sup>2,4,10</sup>, I. Štekl<sup>10</sup>, E. Eckerová<sup>4</sup>, Y. V. Yablokova<sup>2</sup>, and S. A. Yakovlev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

<sup>2</sup>*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow obl., 141980 Russia*

<sup>3</sup>*EvoLogics GmbH, Berlin, 13355 Germany*

<sup>4</sup>*Comenius University, Bratislava, 81499 Slovakia*

<sup>5</sup>*Irkutsk State University, Irkutsk, 664003 Russia*

<sup>6</sup>*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

<sup>7</sup>*Institute of Nuclear Physics of Polish Academy of Sciences (IFJ PAN), Krakow, 60179 Poland*

<sup>8</sup>*Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

<sup>9</sup>*St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, 190008 Russia*

<sup>10</sup>*Czech Technical University in Prague, Prague, 16000 Czech Republic*

\*e-mail: aynutdin@yandex.ru

Received June 10, 2021; revised July 14, 2021; accepted July 15, 2021

The Baikal-GVD deep-water neutrino telescope of the cubic kilometer scale, focused on research in the field of astrophysics and particle physics, is being built in Lake Baikal. As of 2021, the effective volume of the detector reaches 0.4 km<sup>3</sup> for cascades generated by high-energy astrophysical neutrinos. The article describes the design and basic characteristics of the telescope data acquisition system, discusses some aspects of deep-water engineering related to the deployment of the detector, and presents a selected results obtained with the partially complete detector.

*Keywords:* neutrino, muon, neutrino telescope, data acquisition system, deep-water engineering, Baikal