

УДК 539.123

## BAIKAL-GVD – НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП СЛЕДУЮЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ НА ОЗЕРЕ БАЙКАЛ

© 2019 г. А. В. Аврорин<sup>1</sup>, А. Д. Аврорин<sup>1</sup>, В. М. Айнутдинов<sup>1, \*</sup>, Р. Баннаш<sup>7</sup>, И. А. Белолоптиков<sup>2</sup>,  
В. Б. Бруданин<sup>2</sup>, Н. М. Буднев<sup>3</sup>, А. Р. Гафаров<sup>3</sup>, К. В. Голубков<sup>1</sup>, Т. И. Гресь<sup>3</sup>,  
Ж.-А. М. Джилкибаев<sup>1</sup>, Г. В. Домогатский<sup>1</sup>, А. А. Дорошенко<sup>1</sup>, А. Н. Дьячок<sup>3</sup>, Р. Дворницкий<sup>2, 8</sup>,  
А. В. Загородников<sup>3</sup>, В. Л. Зурбанов<sup>3</sup>, К. Г. Кебкал<sup>7</sup>, А. Г. Кебкал<sup>7</sup>, В. А. Кожин<sup>4</sup>, М. М. Колбин<sup>2</sup>,  
К. В. Конищев<sup>2</sup>, А. П. Коробченко<sup>2</sup>, А. П. Кошечкин<sup>1</sup>, В. Ф. Кулепов<sup>5</sup>, Д. А. Кулешов<sup>1</sup>,  
М. Б. Миленин<sup>5</sup>, Р. А. Миргазов<sup>3</sup>, Е. Р. Осипова<sup>4</sup>, А. И. Панфилов<sup>1</sup>, Л. В. Паньков<sup>3</sup>,  
Д. П. Петухов<sup>1</sup>, Е. Н. Плисковский<sup>2</sup>, М. И. Розанов<sup>6</sup>, В. Д. Рушай<sup>2</sup>, Е. В. Рябов<sup>3</sup>,  
Г. Б. Сафронов<sup>2</sup>, Ф. Симкович<sup>2, 8</sup>, А. В. Скурихин<sup>4</sup>, А. Г. Соловьев<sup>2</sup>, М. Н. Сороковиков<sup>2</sup>,  
О. В. Суворова<sup>1</sup>, В. А. Таболенко<sup>3</sup>, Б. А. Таращанский<sup>3</sup>, Л. Файт<sup>2, 8, 9</sup>, С. В. Фиалковский<sup>5</sup>,  
З. Хонц<sup>2</sup>, Е. В. Храмов<sup>2</sup>, М. Д. Шелепов<sup>1</sup>, Б. А. Шойбонов<sup>2</sup>, И. Штекл<sup>2, 9</sup>, С. А. Яковлев<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований,  
Дубна, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Иркутский государственный университет”, Иркутск, Россия

<sup>4</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

<sup>5</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева”, Нижний Новгород, Россия

<sup>6</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Санкт-петербургский государственный морской технический университет”, Санкт-Петербург, Россия

<sup>7</sup>Общество с ограниченной ответственностью “EvoLogics”, Берлин, Германия

<sup>8</sup>Университет имени Коменского, Братислава, Словакия

<sup>9</sup>Чешский технический университет, Прага, Чехия

\*E-mail: aynutdin@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

В настоящее время в оз. Байкал осуществляется развертывание нейтринного телескопа нового поколения – глубоководного черенковского детектора кубокилометрового масштаба Baikal-GVD. В данной работе представлены состояние работ по созданию телескопа и первые физические результаты, полученные на установке.

DOI: 10.1134/S0367676519080052

### ВВЕДЕНИЕ

Глубоководные нейтринные телескопы предназначены для исследований высокоэнергичных процессов в астрофизических объектах и во Вселенной в целом с помощью нейтрино высоких энергий. Нейтринные телескопы первого поколения были созданы последовательно на оз. Байкал (NT200, 1998 г.), в Антарктиде на Южном полюсе (AMANDA, 2000 г.) и в Средиземном море (ANTARES, 2008 г.). Успешная эксплуатация

этих детекторов инициировала создание нейтринных телескопов следующего поколения, с размерами масштаба кубического километра. К наиболее значимым из введенных в эксплуатацию и проектируемых в настоящее время нейтринных телескопов следует отнести IceCube, Baikal-GVD и KM3NeT, которые формируют единую сеть установок “Global Neutrino Network”. План создания телескопа Baikal-GVD [1] включает два этапа. В результате завершения первого

этапа (2020–2021) будет создана установка, состоящая из 2304 оптических модулей, с эффективным объемом  $0.4 \text{ км}^3$ . На следующем этапе эффективный объем будет увеличен до  $1.5 \text{ км}^3$ .

## ОПИСАНИЕ ТЕЛЕСКОПА BAIKAL-GVD

Байкальский нейтринный телескоп представляет собой пространственную структуру оптических модулей (ОМ), сгруппированных в кластеры. Каждый кластер включает в свой состав 288 ОМ, размещенных на 8 вертикальных гирляндах. Длина гирлянды составляет 525 м, расстояния между гирляндами 60 м, расстояния между кластерами 300 м. К 2018 г. в оз. Байкал введено в эксплуатацию три таких кластера.

Общий вид установки показан на рис. 1. Принцип работы детектора основан на регистрации черенковского излучения вторичных мюонов и каскадных ливней, образующихся в нейтринных взаимодействиях, набором оптических модулей. В качестве светочувствительных элементов ОМ используются ФЭУ R7081-100 с фотокатодом диаметром 10 дюймов и квантовой чувствительностью  $\sim 35\%$  [2]. Сигналы с ФЭУ усиливаются и формируются по длительности ( $\sim 40 \text{ нс}$ ), после чего передаются на АЦП для измерения формы импульсов (частота дискретизации 200 МГц). Блоки АЦП расположены в отдельных глубоководных модулях, которые обслуживают до 12 ОМ [3]. Анализ формы импульсов позволяет определить количество сигналов, поступающих с фотоэлектронных умножителей, их заряд и время регистрации. На основании измерений времени регистрации импульсов и их зарядов на всех сработавших каналах установки определяются основные параметры событий: направление и энергия мюонов и каскадных ливней, образовавшихся в результате нейтринных взаимодействий. Точность восстановления направления треков мюонов составляет величину  $\sim 0.5^\circ$ , а энергии каскадных ливней около 20%.

Блоки АЦП оснащены собственными кварцевыми генераторами, позволяющими измерять время регистрации импульсов, поступающих с ФЭУ. Для привязки времен регистрации импульсов, измеренных разными блоками АЦП в пределах одного кластера, к единой временной шкале используется сигнал общий триггер. Для синхронизации работы кластеров на каждом из них измеряется время формирования общего триггера с точностью около 2 нс. Для этих измерений используется единый источник тактовой частоты, сигналы от которого передаются по оптоволоконным линиям связи на все кластеры телескопа. Привязка к Мировому времени часов источника тактовой частоты осуществляется при помощи GPS/GLONASS и прецизионного сервера точно-

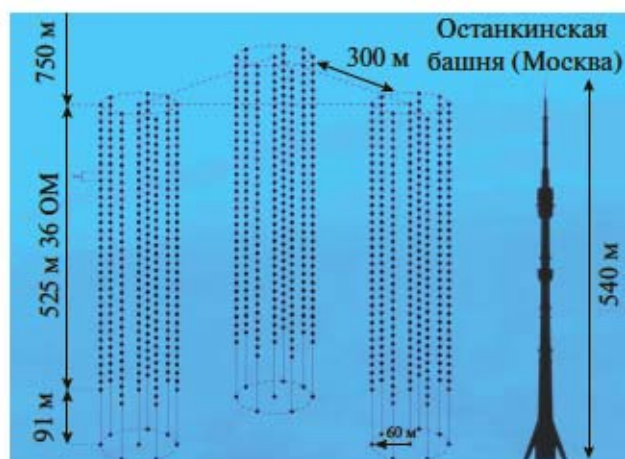


Рис. 1. Три кластера нейтринного телескопа Baikal-GVD.

го времени GMR-5000 со встроенным рубидиевым осциллятором: точность временной привязки 15 нс. Для временной и амплитудной калибровки каналов телескопа используются светодиодные и лазерные источники света. Точность временной калибровки составляет величину около 2 нс. Координаты оптических модулей измеряются при помощи акустической системы позиционирования: 4 акустических модема установлены на каждой гирлянде кластера. Точность позиционирования составляет 5–20 см в зависимости от расстояния от ОМ до акустических модемов вдоль гирлянды и величины отклонения гирлянды от вертикального положения из-за течений оз. Байкал.

## ПЕРВЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Модульная структура регистрирующей системы Baikal-GVD позволяет проводить физические исследования уже на стадии развертывания установки. Нейтринный телескоп был включен в режим постоянной экспозиции с апреля 2015 г., с момента введения в эксплуатацию первого кластера. Приоритетными задачами были исследования мюонных нейтрино и каскадов высокой энергии для поиска астрофизических источников нейтрино, и поиск нейтринных событий, коррелирующих по времени и направлению с источниками переменной светимости. Выделение мюонных нейтрино осуществлялось на основании регистрации мюонов, приходящих из нижней полусферы Земли. Каждый кластер Baikal-GVD регистрирует  $\sim 1$  событие такого типа в день, что удовлетворительно согласуется с результатами моделирования. В результате поиска нейтрино, регистрируемых по генерируемым ими каскадам высокой энергии [4], было выделено два события, кандидата на нейтрино астрофизической природы. Первое событие с энергией 107 ТэВ

было зарегистрировано в 2015 г. (расстояние до оси кластера 68 м). Второе событие (2016 г.) было зарегистрировано внутри геометрического объема установки и имело энергию 155 ТэВ. Координаты этих событий в экваториальной системе: прямое восхождение 139.5° и 173.4°, склонение 5.6° и 13.9° в экваториальных координатах, соответственно для первого и второго кандидатов.

Наиболее интересным для исследований за последнее время источником переменной светимости стала галактика NGC 4993, в которой произошло слияние двух нейтронных звезд; вызванная этим событием гравитационная волна была зарегистрирована детекторами LIGO и Virgo 17 августа 2017 г. (GW170817). Поиск нейтринных событий в направлении от этого источника на телескопе Baikal-GVD осуществлялся в каскадной моде во временных интервалах  $\pm 500$  с и 14 дней после регистрации гравитационной волны (зенитный угол NGC 4993 на момент регистрации составлял 93.3°). События в направлении от NGC 4993 в указанных временных интервалах не

были зарегистрированы. При отсутствии измеренного сигнала были установлены верхние пределы на потоки нейтрино, сопоставимые по величине с пределами, полученными на установках ANTARES, Ice Cube и Pierre Auger [5].

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 16-29-13032, 17-02-01237).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Avrorin A.D., Avrorin A.V., Aynutdinov V.M. et al. // Proc. 35th ICRC. (Busan, 2017). P. 1034.*
2. *Аврорин А.В., Аврорин А.Д., Айнутдинов В.М. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13. № 6. С. 1143.*
3. *Аврорин А.В., Аврорин А.Д., Айнутдинов В.М. и др. // ПТЭ. 2014. № 3. С. 28; Avrorin A.V., Avrorin A.D., Aynutdinov V.M. et al. // Instr. Exp. Tech. 2014. V. 57. № 3. P. 262.*
4. *Avrorin A.D., Avrorin A.V., Aynutdinov V.M. et al. // Proc. 35th ICRC. (Busan, 2017). P. 962.*
5. *Avrorin A.D. et al. (Baikal-GVD Collaboration) // arXiv: 1808.10353. 2018.*