

В. Р. Костылева¹✉, В. В. Пучинская¹, И. В. Парко¹

Детекция нейтрино: вклад байкальского глубоководного телескопа в исследование космоса

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: vika.kostyleva2002@gmail.com

Аннотация. Данная статья посвящена изучению конструкции, принципов работы и ключевых научных результатов глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD, расположенного в озере Байкал. В статье рассматривается физический механизм регистрации черенковского излучения, которое возникает при прохождении частиц через толщу воды. Отдельное внимание уделяется устройству оптических модулей. В качестве чувствительного элемента используется фотоэлектронный умножитель R7081-100 с фотокатодом диаметром 10 дюймов, помещенный в сферический корпус из боросиликатного стекла. Описывается состав электронного блока, включающего источник высокого напряжения, усилитель сигналов, контроллер и светодиодную систему калибровки. В статье также представлены результаты анализа данных, собранных с 2018 по 2024 год. Накопленная статистика позволила группе ученых зарегистрировать восемь нейтринных потоков с энергией от 214 до 1200 ТэВ. Установлено, что от 26 до 49 процентов этих частиц образуются внутри Млечного Пути. Полученные результаты совпадают с данными обсерватории IceCube. К 2027 году Байкальский телескоп планируют расширить до 1 кубического км. Реализация этих работ позволит телескопу Baikal-GVD войти в число крупнейших нейтринных обсерваторий мира.

Ключевые слова: нейтринный телескоп, черенковское излучение, нейтрино экстремально высоких энергий, Байкал

V. R. Kostyleva¹✉, V. V. Puchinskaya¹, I. V. Parko¹

Neutrino detection: the contribution of the baikal deep-sea telescope to space exploration

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: vika.kostyleva2002@gmail.com

Abstract. This article is devoted to the study of the design, principles of operation and key scientific results of the Baikal-GVD deep-sea neutrino telescope located in Lake Baikal. The article considers the physical mechanism of registration of Cherenkov radiation, which occurs when particles pass through the water column. Special attention is paid to the design of optical modules. An R7081-100 photomultiplier with a photocathode 10 inches in diameter, housed in a spherical borosilicate glass housing, is used as a sensing element. The composition of an electronic unit is described, which includes a high-voltage source, a signal amplifier, a controller, and an LED calibration system. The article also presents the results of an analysis of data collected from 2018 to 2024. The accumulated statistics allowed the group of scientists to register eight neutrino fluxes with energies from 214 to 1200 TeV. It has been established that from 26 to 49 percent of these particles are formed inside the Milky Way. The results obtained are consistent with the data from the IceCube observatory. By 2027, the Baikal Telescope is planned to be expanded to 1 cubic km. The implementation of these works will allow the Baikal-GVD telescope to become one of the largest neutrino observatories in the world.

Keywords: neutrino telescope, cherenkov radiation, extremely high-energy neutrinos, Baikal

Введение

Глубоководный телескоп Baikal-GVD установлен в озере Байкал, в 3,5 км от берега, на глубине до 1300 метров. Его задача – улавливать и изучать нейтрино высоких энергий, приходящие от космических источников [1, 2].

Озеро Байкал выступает в роли природного фильтра, ослабляющего помехи для детекторов. Работа телескопа построена на фиксации черенковского излучения, которое появляется, когда нейтрино вступает во взаимодействие с атомами воды. При таком столкновении образуются частицы, летящие сквозь воду со скоростью, превышающей световую. Они порождают голубые световые вспышки.

Эти сигналы принимают оптические датчики, натянутые на тросах, из которых собрана конструкция телескопа. Собирая и анализируя информацию с нескольких сотен датчиков, исследователи вычисляют направление движения нейтрино и его энергию [3, 4]. На рисунке ниже представлен нейтринный телескоп Baikal-GVD (рис. 1).



Рис. 1. Нейтринный телескоп Baikal-GVD

Нейтрино – это нейтральные частицы без заряда, с малой массой и скоростью, почти равной световой. Они крайне слабо взаимодействуют с веществом. Благодаря этим свойствам, нейтрино способны достигать Земли из глубин галактик почти без изменений [5, 6].

В телескопе Baikal-GVD регистрация черенковского излучения выполняется с помощью оптических модулей (ОМ). В качестве чувствительного к свету элемента применяется фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) R7081-100 с фотокатодом диаметром 10 дюймов. Спектральная чувствительность фотокатода

охватывает диапазон 300-650 нм, максимальная квантовая эффективность достигает примерно 35 %.

ФЭУ помещается в сферический стеклянный корпус из боросиликатного стекла диаметром 42 см, предназначенный для работы на глубине. Оптическое сопряжение фотокатода со стеклянным корпусом осуществляется с помощью силиконового двухкомпонентного геля [7, 8].

Для ослабления влияния геомагнитного поля на работу ФЭУ установлен защитный экран (сетка) из отожженного пермаллоя. Электронный блок оптического модуля крепится прямо на цоколь ФЭУ. В его состав входят: источник высокого напряжения, делитель напряжения с сопротивлением 18 МОм, усилитель сигналов ФЭУ, управляющий модуль (контроллер ОМ) и светодиодная система калибровки. Указана схема конструкции оптического модуля BaikalGVD (рис. 2).

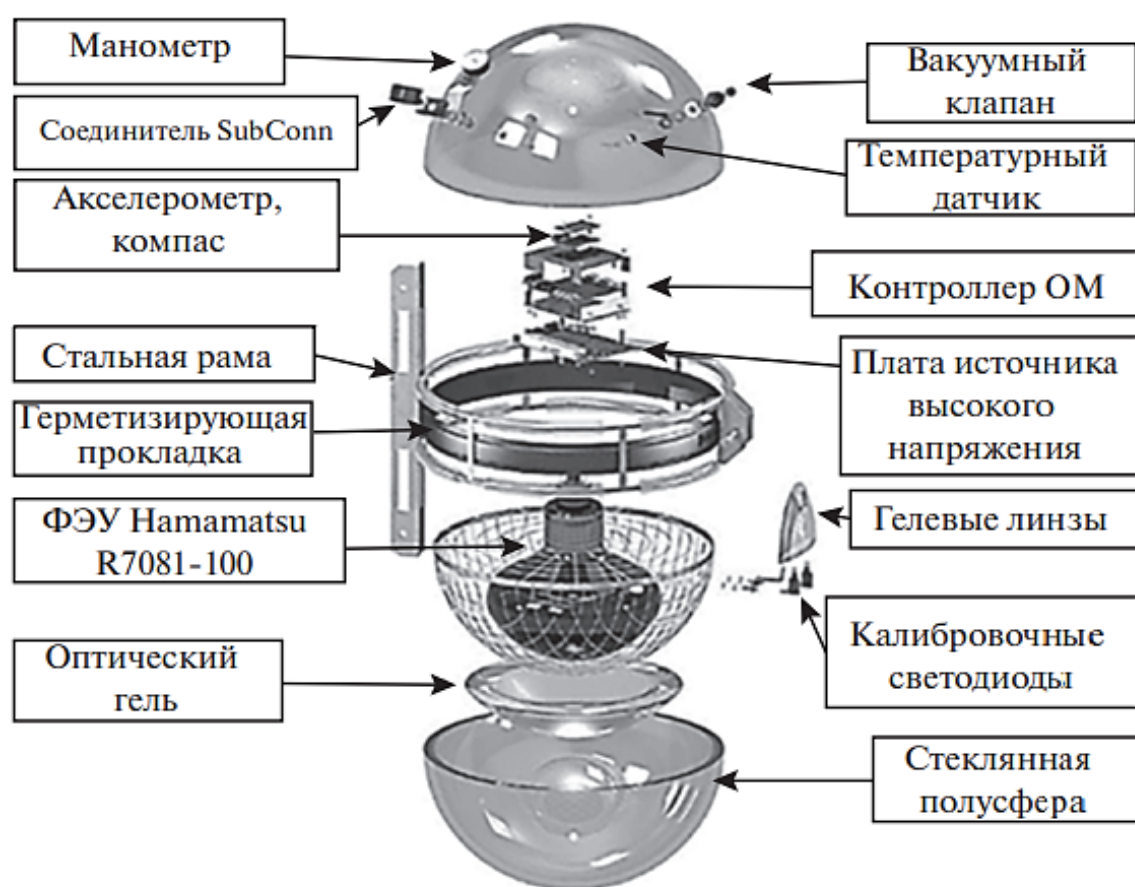


Рис. 2. Схема конструкции оптического модуля BaikalGVD

Сильные стороны Байкальского нейтринного телескопа связаны с особенностями озера: пресная вода Байкала содержит гораздо меньше радиоактивных элементов по сравнению с морской. Благодаря этому снижается число ложных срабатываний и растет чувствительность телескопа. Значительная глубина защищает оборудование от космических лучей и посторонних шумов – нейтрино удастся регистрировать с высокой точностью [9, 10].

Baikal-GVD входит в состав GNN вместе с ANTARES, KM3NeT и IceCube. Вместе эти детекторы формируют глобальную сеть, которая позволяет комплексно наблюдать за нейтринным небом [11]. Конструктивные параметры телескопов Baikal-GVD и KM3NeT показаны в табл. 1.

Таблица 1. Конструктивные параметры телескопов Baikal-GVD и KM3NeT

Характеристика	Baikal-GVD	KM3NeT
Расположение	Озеро Байкал (Россия)	Средиземное море
Объем (активный)	0,6 куб. км (2024), план до 1 куб. км (к 2027)	1 куб. км (полная конфигурация)
Глубина погружения	750 – 1300 метров	Детектор ARCA (KM3NeT-It) – 3450 м Детектор ORCA (KM3NeT-Fr) – 2475 м
Количество модулей	288 Оптических Модулей (ОМ), распределенных по 8 кластерам (2024)	18 DOMs на линию (примерно 4140 модулей для ARCA, если будет 230 линий)
Количество тросов/кластеров	12 кластеров	28 тросов

Научная группа под руководством Сергея Троицкого проанализировала данные телескопа Baikal-GVD, накопленные за шесть лет (с 2018 по 2024 год). Статистика позволила перейти от регистрации единичных событий к анализу закономерностей в потоках нейтрино экстремально высоких энергий. Ученые изучили восемь нейтринных потоков энергии – от 214 до 1200 тераэлектронвольт (ТэВ). Большая часть этих частиц появилась в области диска нашей Галактики. Вероятность такого заключения – 99,97 %. Это означает, что от 26 % до 49 % этих частиц образуются внутри Млечного Пути [12, 13].

Ранее считалось, что Млечный Путь дает не более 10 % нейтрино высоких энергий – основным источником полагали внегалактические объекты. Сведения, собранные Baikal-GVD, совпадают с более ранними измерениями обсерватории IceCube в Антарктиде и свидетельствуют о том, что Млечный Путь вносит гораздо более весомый вклад в общий поток высокоэнергетических нейтрино, чем предполагалось [14, 15]. На рисунке ниже указана карта неба с наложением источников высокоэнергетических нейтрино (рис. 3).

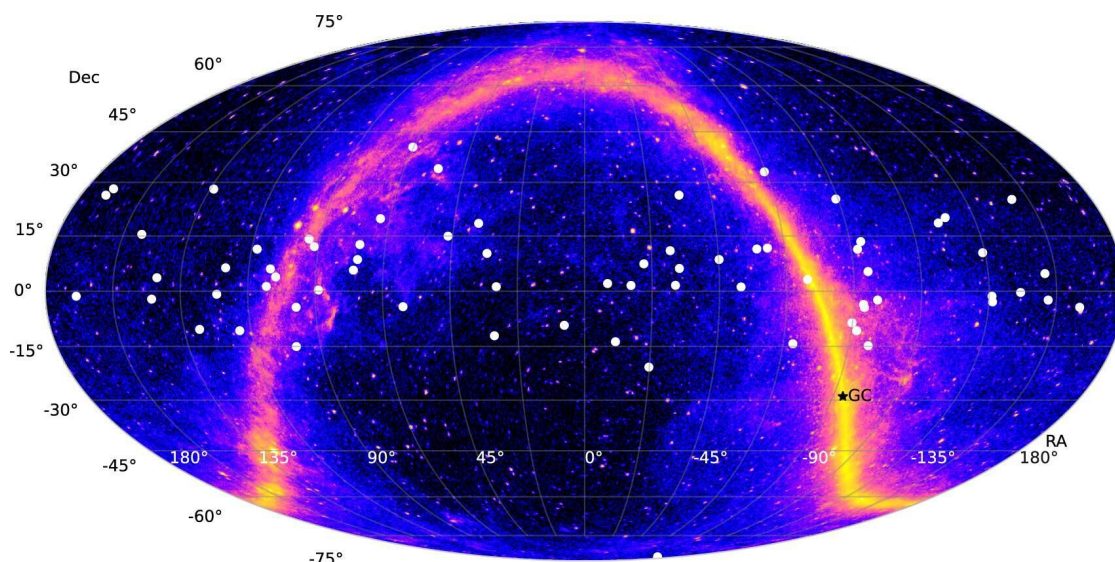


Рис. 3. Карта неба с наложением источников высокоэнергетических нейтрино

Цветом отображено небо в гамма-лучах, плоскость Галактики четко выделяется. Белыми кружками обозначены направления прихода нейтрино. Звездочкой отмечен центр Галактики (GC).

Заключение

Строительство комплекса началось в 2015 году. В ближайшие несколько лет планируется расширить телескоп, разместив несколько тысяч нейтринных сенсоров на дне озера Байкал. Эти работы позволят телескопу войти в число крупнейших и наиболее точных нейтринных обсерваторий мира.

К 2027 году объем телескопа должен достигнуть примерно одного кубического километра. Вместе с другими проектами, такими как, Тихоокеанским нейтринным экспериментом (P-ONE) у острова Ванкувер, Baikal-GVD расширит возможности изучения нейтрино в диапазоне энергий от ТэВ до петаэлектронвольт (ПэВ) в южном полушарии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сигнал пойман. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://ria.ru/20230303/baykal-1855448271.html>
2. Baikal-GVD. Официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: <https://baikal-gvd.jinr.ru/>
3. Байкальский подводный нейтринный телескоп. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://ru.ruwiki.ru/wiki/Байкальский_подводный_нейтринный_телескоп
4. Телескоп на дне Байкала: зачем он нужен и почему его продолжают расширять до 2030 года. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ixbt.com/live/science/teleskop-na-dne-baykala-zachem-on-nuzhen-i-pochemu-ego-prodolzhayut-rasshiryat-do-2030-goda.html>
5. Что за глубоководный нейтринный телескоп Baikal-GVD?. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://aif.ru/society/science/chto_zh_glubokovodnyy_neytrinnyy_teleskop_baikal-gvd?ysclid=moscierjwd860767274
6. Нейтрино. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.ruwiki.ru/wiki/Нейтрино>

7. Глубоководный нейтринный телескоп в озере Байкал. / Аврорин, А. В. Аврорина, А. Д. Айнутдинова, В. М. Аллахвердян, В. А. Банаш, П. и др. – Текст : электронный // Ядерная физика и инжиниринг, 2021, том 12, № 6, с. 315–325.
8. Нейтринный телескоп Baikal-GVD. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://scientificrussia.ru/articles/nejtrinnyj-teleskop-baikal-gvd>
9. Нейтринный телескоп на дне озера. / Новиков, Г. И. Парко, И. В. // СибОптика-2022. Актуальные вопросы высокотехнологичных отраслей Том 8 №2 – Новосибирск: СГУГиТ, 2022. – 145 с.
10. Нейтринная обсерватория на дне Байкала. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/companies/vdsina/articles/551282/>
11. Нейтрино ловят на глубине. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://kiosk.beeline.uz/article/nauka-i-zizn-2/nejtrino-lovat-na-glubine>
12. Российские астрофизики обнаружили «нейтринную аномалию». Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://hi-tech.mail.ru/news/120413-rossijskie-astrofiziki-obnaruzhili-nejtrinnuyu-anomaliyu/>
13. Осцилляции нейтрино: перспективы практического применения в астрономии. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ostillyatsii-neytrino-perspektivy-prakticheskogo-primeneniya-v-astronomii/viewer>
14. Ученые обнаружили нейтринное излучение млечного. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://scientificrussia.ru/articles/ucenye-obnaruzili-nejtrinnoe-izlucenie-mlecnogo-puti>
15. Байкальский телескоп зарегистрировал нейтрино высоких энергий из Млечного Пути. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://nplus1.ru/news/2025/03/31/bgvd-high-energy-neutrinos>

© В. Р. Костылева, В. В. Пучинская, И. В. Парко, 2026