

УДК 524.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ В БАССЕЙНЕ ЧЕРЕНКОВСКОГО ВОДНОГО ДЕТЕКТОРА НЕВОД

© 2021 г. С. С. Хохлов¹, *, Е. А. Задеба¹, В. В. Киндин¹, К. Г. Компаниец¹, Н. А. Пасюк¹,
А. А. Петрухин¹, В. В. Шутенко¹, И. И. Яшин¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

*E-mail: sskhokhlov@mephi.ru

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

Обсуждается калибровка и сравнение характеристик оптических модулей нейтринных телескопов в объеме черенковского водного детектора НЕВОД. Приводятся результаты измерения отклика прототипа оптического модуля с фотоумножителем Hamamatsu R877 на одиночные мюоны и события с большим энерговыделением.

DOI: 10.31857/S0367676521040165

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия для исследований в области физики частиц и астрофизики активно развиваются черенковские водные нейтринные телескопы, такие как IceCube, Baikal-GVD и KM3Net. Основным детектирующим элементом нейтринных телескопов являются оптические модули, причем возможности телескопа возрастают, если оптический модуль имеет изотропную чувствительность в 4π-телесном угле. Такой модуль должен состоять из нескольких разнонаправленных фотоэлектронных умножителей. Впервые идея квазисферического модуля была предложена в 1979 году на 16-й международной конференции по космическим лучам (ICRC) [1]. Позже эта идея была реализована при создании квазисферического модуля из 6 ФЭУ – базового элемента черенковского водного детектора НЕВОД [2].

Одной из важных экспериментальных проблем нейтринных телескопов является калибровка оптических модулей различных систем в одинаковых условиях. Такая калибровка может быть проведена на экспериментальном комплексе НЕВОД, установки которого позволяют выделять треки одиночных околоразвертикальных и околоразвертикальных мюонов, а также регистрировать события с большими энерговыделениями и проводить исследования отклика тестируемого оптического модуля на эти события [3]. На проведение такой калибровки получен патент на изобретение [4].

В 2021 г. в объеме детектора НЕВОД планируется провести калибровку нового оптического модуля mDOM (multi-PMT Digital Optical Module),

разрабатываемого в Университете г. Мюнстер (Германия) для развития Нейтринной обсерватории IceCube [5]. Модуль mDOM состоит из 24 трехдюймовых ФЭУ, размещенных в едином корпусе. На основе этих модулей планируется создать систему IceCube-Upgrade, отличающуюся от основной части детектора IceCube более низким (несколько ГэВ) порогом при регистрации нейтринных событий.

Для отработки методики калибровки в объеме бассейна был помещен прототип оптического модуля с фотоумножителем Hamamatsu R877. Данный тип ФЭУ никогда ранее не использовался для регистрации черенковского излучения в воде.

Цель работы – реализовать на практике схему измерения и сравнения характеристик оптических модулей нейтринных телескопов, предложенную в патенте на изобретение RU 2726265, и провести измерения отклика прототипа оптического модуля с ФЭУ Hamamatsu R877 на черенковское излучение в воде от одиночных мюонов и от событий с большим энерговыделением.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ С ФЭУ НАМАМАТСУ R877

С 18 августа по 23 сентября 2020 г. были проведены измерительные серии по исследованию характеристик отклика прототипа оптического модуля с фотоумножителем Hamamatsu R877. При тестировании проводилось измерение отклика на одиночные околоразвертикальные и околоразвертикальные

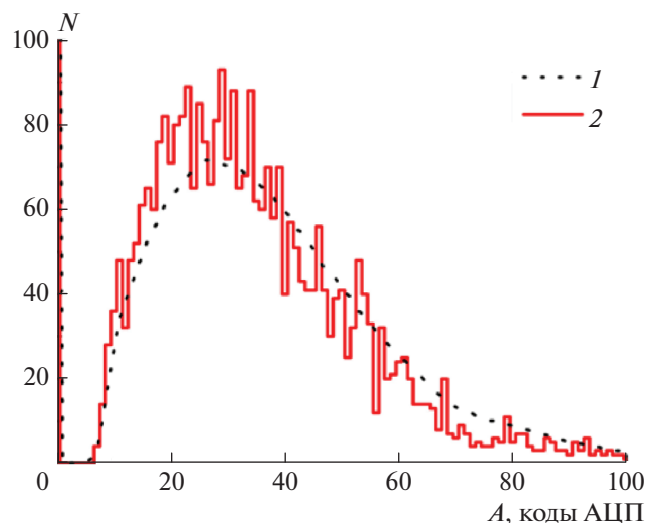


Рис. 1. Спектр отклика ФЭУ на одиночные околоразвертикальные мюоны, выделенные телескопом; 1 – ФЭУ-200, 2 – ФЭУ Hamamatsu R877.

тальные мюоны. Околоразвертикальные мюоны отбирались системой калибровочных телескопов [6]. На рис. 1 представлен амплитудный спектр откликов на мюоны со средней энергией 4 ГэВ, выделенные вертикальным телескопом, ось которого параллельна плоскости фотокатода ФЭУ и находится на расстоянии 1 м от оси оптического модуля. На том же рисунке представлен средний спектр для 150 фотоумножителей ФЭУ-200 детектора НЕВОД, калибруемых в тех же условиях. Коэффициенты усиления диодных систем ФЭУ Hamamatsu R877 и ФЭУ-200 приблизительно равны между собой, но ФЭУ R877 имеет более высокую квантовую чувствительность. Поэтому, несмотря на то, что ФЭУ Hamamatsu R877 имеет меньший фотокатод по сравнению с ФЭУ-200 (внешние диаметры колб составляют 13 и 17 см, диаметры активных зон 11 и 15 см соответственно), измеренные спектры близки между собой. Эффективность регистрации телескопных событий для ФЭУ R877 составила $92.7 \pm 0.5\%$, для ФЭУ-200 – $92.15 \pm 0.05\%$; средняя амплитуда для ФЭУ R877 равна 34.9 ± 0.5 кода АЦП, а для ФЭУ-200 – 36.93 ± 0.04 кода АЦП (4 кода АЦП соответствуют отклику ФЭУ величиной 1 фотоэлектрон).

Расположенные вокруг бассейна ЧВД НЕВОД супермодули координатно-трекового детектора ДЕКОР [7] позволяют с высокой точностью восстанавливать треки околоразвертикальных мюонов со средними энергиями 70–100 ГэВ, проходящих на различных расстояниях от оптического модуля. Зависимости средних откликов от расстояния, полученные по ~16000 событиям, приведены на рис. 2. Зависимость для ФЭУ-200 явля-

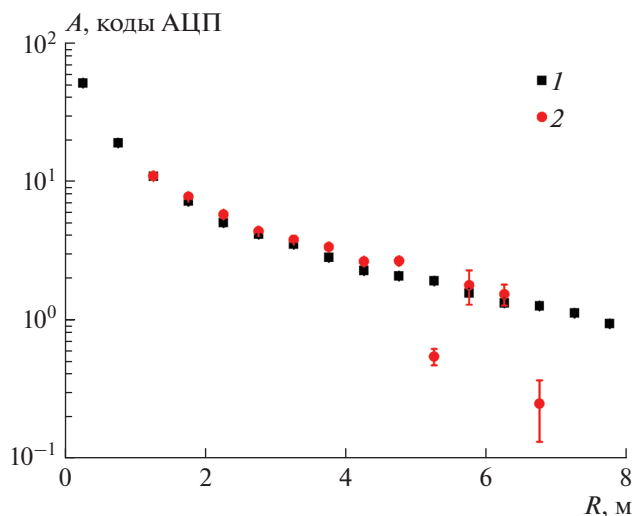


Рис. 2. Зависимость среднего отклика ФЭУ от расстояния до околоразвертикального мюона; 1 – ФЭУ-200, 2 – ФЭУ Hamamatsu R877.

ется усредненной по большому количеству ФЭУ, в то время как зависимость для ФЭУ Hamamatsu R877 измерена только для одного оптического модуля, для которого не было событий с треками на расстояниях менее 1 м, кроме того, на расстояниях от 5 до 7 м было зарегистрировано всего 28 мюонов, черенковское излучение от которых частично затенялось оптическими модулями пространственной решетки ЧВД НЕВОД, что объясняет резкое уменьшение средней амплитуды на расстояниях 5.25 и 6.75 м). Таким образом, сравнивать зависимости среднего отклика можно на расстояниях от 1 до 5 м, где они близки друг к другу.

В триггерной системе черенковского водного детектора НЕВОД предусмотрен специальный триггерный сигнал “60с” (с – coincidence), вырабатываемый в том случае, когда в детекторе сработало не менее 60 оптических модулей, причем в каждом из них должно сработать не менее двух ФЭУ. Триггерный сигнал “60с” используется для анализа событий с большим энерговыделением, связанным с попаданием в бассейн стволов ШАЛ [8], прохождением через детектор группы мюонов [9] или каскадных ливней с энергиями более 10 ГэВ, рожденных адронами или одиночными мюонами [10].

На рис. 3 представлены спектры откликов ФЭУ-200 и ФЭУ Hamamatsu R877 на события с большими энерговыделениями в воде. Использование двухдиодного съема сигналов позволяет достичь широкого динамического диапазона регистрируемых сигналов. Как можно видеть, спектры откликов ФЭУ подобны и на больших ампли-

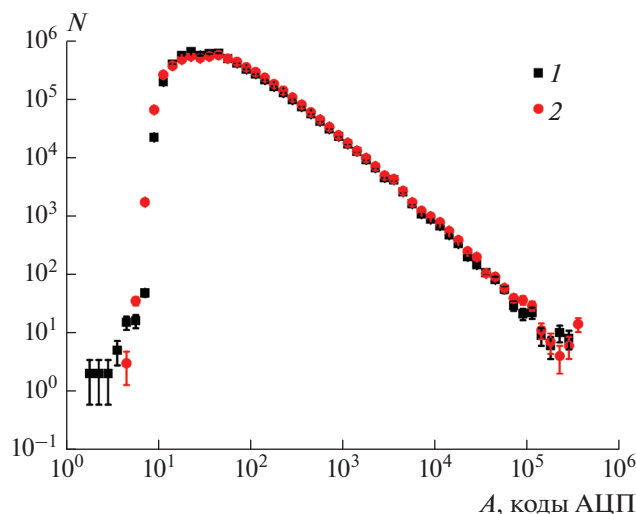


Рис. 3. Спектр откликов ФЭУ на события с большим энерговыделением в воде: 1 – ФЭУ-200, 2 – ФЭУ Hamamatsu R877.

тудах близки к степенной зависимости с дифференциальным показателем $(\gamma + 1) = 2.4$, что может свидетельствовать о регистрации событий ШАЛ с примесью других событий с большим энерговыделением (групп мюонов и каскадных ливней).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В экспериментальном комплексе НЕВОД реализована схема измерения и сравнения характеристик оптических модулей нейтринных телескопов, предложенная в патенте на изобретение RU 2726265. Впервые измерены отклики прототипа оптического модуля с ФЭУ Hamamatsu R877 на черенковское излучение в воде от одиночных мюонов и от событий с большим энерговыделением,

которые оказались близкими к откликам оптического модуля с ФЭУ-200. В 2021 г. в ЧВД НЕВОД планируется провести калибровку оптического модуля mDOM для нейтринного телескопа IceCube-Upgrade.

Работа выполнена на уникальной научной установке “Экспериментальный комплекс НЕВОД” при поддержке грантом Президента РФ МК-3444.2019.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Borog V.V., Gavshin S.B., Petrukhin A.A. et al. // Proc. 16th ICRC (Kyoto, 1979). V. 10. P. 380.
2. Петрухин А.А. // УФН. 2015. № 5. С. 521; Petrukhin A.A. // Phys. Usp. 2015. V. 58. No. 5. P. 486.
3. Petrukhin A.A., Khokhlov S.S. // EPJ Web Conf. 2019. V. 207. Art. No 07006.
4. Амельчаков М.Б., Барбашина Н.С., Богданов А.Г. и др. Комплекс для измерения угловой зависимости отклика оптического модуля нейтринного черенковского водного телескопа. Пат. РФ № 2726265. 2020.
5. Classen L., Kappes A. for the IceCube Collaboration // EPJ Web Conf. 2019. V. 207. Art. No 06004.
6. Амельчаков М.Б., Богданов А.Г., Задеба Е.А. и др. // ПТЭ. 2018. № 5. С. 49; Amelchakov M.B., Bogdanov A.G., Zadeba E.A. et al. // Instrum. Exp. Tech. 2018. V. 61. P. 673.
7. Барбашина Н.С., Езубченко А.А., Кокоулин Р.П. и др. // ПТЭ. 2000. № 6. С. 20; Barbashina N.S., Ezubchenko A.A., Kokoulin R.P. et al. // Instrum. Exp. Tech. 2000. V. 43. P. 743.
8. Gromushkin D.M., Bogdanov F.A., Bulan A.V., Yurin K.O. // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1390. Art. No. 012068.
9. Kokoulin R.P., Barbashina N.S., Bogdanov A.G. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 2020. V. 952. Art. No. 161586.
10. Khokhlov S.S., Bogdanov A.G., Khomyakov V.A. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2020. V. 952. Art. No. 161850.

Study of characteristics of optical modules in the volume of Cherenkov water detector NEVOD

S. S. Khokhlov^{a,*}, E. A. Zadeba^a, V. V. Kindin^a, K. G. Kompaniets^a, N. A. Pasyuk^a,
A. A. Petrukhin^a, V. V. Shutenko^a, I. I. Yashin^a

^aNational Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: sskhokhlov@mephi.ru

The possibility of measuring the characteristics of the response of optical modules of neutrino telescopes to various classes events registered in the volume of the Cherenkov water detector NEVOD is discussed. The results of testing an experimental optical module with Hamamatsu R877 photomultiplier for single muons and events with a high energy deposite are presented.