

Т. Ж. Оразгали

Об измерении оптических характеристик водной среды Байкальского нейтринного телескопа

С 2015 г. на озере Байкал разворачивается глубоководный нейтринный телескоп кубокилометрового масштаба НТ1000. Детектор главным образом предназначен для исследования астрофизических потоков нейтрино в диапазоне энергий от нескольких сотен ГэВ до 100 ПэВ. Первая фаза НТ1000 будет представлять собой массив из 2300 оптических модулей с инструментальным объемом около 0.4 кубических километров, которую планируется завершить к 2020–2021 гг. Оптические свойства байкальской воды дают возможность создания нейтринного телескопа с уникальными по чувствительности и угловому разрешению свойствами, открывающими новые горизонты в астрономии и астрофизике. В статье приводятся основные сведения о НТ1000 и о разрабатываемом методе измерения оптических характеристик водной среды детектора с помощью мощного лазерного источника света.

Ключевые слова: нейтринный телескоп, оптический модуль, черенковское излучение, лазерный источник

Об авторах

Оразгали Токжан Жадигеркызы – магистрант кафедры ядерной физики государственного университета «Дубна», инженер Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Джелепова Объединенного института ядерных исследований. *E-mail:* tokzhan.ozargali@gmail.com 141980 Московская область, г. Дубна, ул. Ленинградская, 10.

Нейтрино – это стабильная нейтральная частица, которая имеет очень малую массу и взаимодействует с веществом только через слабые и гравитационные взаимодействия и, следовательно, не отклоняется межзвездными магнитными полями, может приходить к нам из самых удаленных уголков Вселенной, выходить из самых недр астрофизических источников. Впервые в 1960 г. М. Марковым был предложен метод глубоководного детектирования астрофизических нейтрино, основанный на регистрации черенковского излучения заряженных частиц, образующихся в результате взаимодействия нейтрино в грунте или в эффективном объеме детектора. На сегодняшний момент в мире работают три крупных нейтринных телескопа: *IceCube* на Южном полюсе, *ANTARES* в Средиземном море и Байкальский глубоководный нейтринный телескоп НТ1000. Все они размещены в есте-

ственных прозрачных средах глубоко под поверхностью воды или льда. Детекторы телескопа регистрируют излучение Вавилова – Черенкова, вызванное прохождением через чувствительный объем детектора мюонов и ливней частиц, образующихся при взаимодействии нейтрино с веществом.

1. Байкальский нейтринный телескоп НТ-1000

Байкальский глубоководный нейтринный телескоп создается в южной части озера Байкал. Глубина озера на месте расположения нейтринного телескопа составляет 1366 м. Телескоп будет состоять из так называемых кластеров – независимых рядом расположенных детекторов нейтрино. На данный момент в Байкале работает три первых кластера (рис. 1.).

На рис. 2 показан внешний вид оптического модуля (ОМ). Он состоит из 10 дюймового фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) R7081HQE (площадь примерно 500 см²) япон-

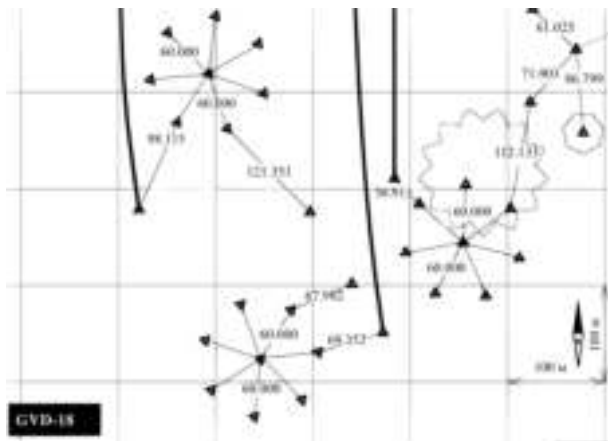


Рис. 1. Схематический вид нейтринного телескопа



Рис. 2. Внешний вид оптического модуля

ской фирмы *Hamamatsu*, отличительной особенностью которого является высокая квантовая эффективность фотокатода.

Фотоэлектронный умножитель помещен в специальную глубоководную стеклосферу диаметром 17 дюймов с низким содержанием радиоактивности. Между ФЭУ и стеклосферой залит гель, служащий для надежной фиксации ФЭУ, а также в качестве оптического контакта. Фотоэлектронный умножитель обернут в пермалоевую сетку

для подавления магнитного поля Земли внутри прибора. В оптическом модуле имеются функциональные элементы, необходимые для нормальной работы ФЭУ, такие как делитель, усилитель, контроллер и высоковольтный источник питания. На ОМ расположен глубоководный промышленный пятиштырьковый разъем, через который производится питание модуля, его управление и получение с него данных.

Оптический модуль устанавливаются на вертикальные грузонесущие кабели, образуя гирлянды. На одной гирлянде расположены 36 ОМ с шагом 15 м. Самый нижний ОМ находится на глубине 1275 м или на 91 м над дном. Самый верхний ОМ находится на глубине 750 м. Солнечный свет полностью поглощается на глубине 500 м. Кластер состоит из центральной гирлянды и 7 периферийных гирлянд, расположенных от центральной гирлянды на расстоянии 60 м. Расстояние между центральными гирляндами кластеров составляет 300 м.

2. Черенковское излучение

Нейтринный телескоп представляет собой трехмерный набор фотоумножителей, предназначенных для регистрации черенковского света, испускаемого продуктами взаимодействия нейтрино. Информация, полученная из числа обнаруженных фотонов и их времени прибытия, используется для определения направления прихода и энергии нейтрино.

Черенковское излучение рождается тогда, когда заряженная частица распространяется в среде со скоростью большей скорости света в этой среде. В этом случае заряженная частица приводит к поляризации молекул вдоль ее траектории. Когда электроны молекул возвращаются в состояние равновесия, испускается когерентное излучение в конусе с характерным углом θ_C , определенный выражением

$$\cos \theta_C = \frac{c/n}{\beta c} = \frac{1}{\beta n}, \quad (1)$$

где n – показатель преломления среды; β – скорость частиц в единицах c . Для реляти-

вистских частиц ($\beta \simeq 1$) и для показателя преломления байкальской воды ($n \simeq 1.3330$) черенковский угол равен $\theta_C \simeq 41^\circ$.

Количество черенковских фотонов N_γ , излучаемых на единицу длины волны $d\lambda$ и пройденное расстояние dx заряженной частицей заряда e , определяется выражением

$$\frac{d^2 N}{dx d\lambda} = 2\pi\alpha \frac{e}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2}\right), \quad (2)$$

где λ – длина волны светового излучения. Из этой формулы можно видеть, что более короткие волны вносят более значительный вклад в черенковское излучение. Для подводных нейтринных телескопов поглощение света водой и реакция фотоумножителя будут сильно подавлять некоторые длины волн. Количество черенковских фотонов, излучаемых на метр в типичном диапазоне длин волн, в котором ФЭУ имеют максимальную эффективность (300–600 нм), составляет около 3.5×10^4 .

3. Оптические свойства воды озера Байкал

Основными оптическими параметрами, определяющими распространение света с длиной волны λ в прозрачных средах, являются показатель поглощения $a(\lambda)$, показатель рассеяния $\sigma(\lambda)$, индикатриса рассеяния $\chi(\mu, \lambda)$ ($\mu = \cos(\theta)$, θ – угол рассеяния фотона) и скорость распространения света в среде $v(\lambda)$. Из анализа данных измерений оптических параметров глубинных вод озера Байкал следует, что длина поглощения $L_a = 1/a(\lambda)$ является достаточно стабильным параметром с характерным значением $20 \div 24$ м в окне прозрачности воды ($\lambda = 480 \div 500$ нм). Сезонные изменения длины поглощения, как правило, не превышают 20%. В отличие от длины поглощения, длина рассеяния $L_s = 1/\sigma(\lambda)$ байкальской воды меняется в существенно более широких пределах. При характерных значениях $L_s = 30 \div 50$ м в окне прозрачности воды в отдельные периоды измерений наблюдались изменения длины рассеяния от $15 \div 20$ м до 70 м. Оптические свойства байкальской воды в районе расположения нейтринного телескопа проводились с помощью специализи-

рованного измерительного комплекса ASP-15. (см. гл. 6 [3]).

Индикатриса рассеяния выражается через дифференциальное сечение рассеяния:

$$\chi(\mu, \lambda) = \frac{d\sigma}{\sigma d\mu}, \quad (3)$$

$$\int_{-1}^1 \chi(\mu, \lambda) d\mu = 1. \quad (4)$$

Индикатриса рассеяния света глубинных вод оз. Байкал является сильно анизотропной функцией и характеризуется средним углом рассеяния порядка 0.86–0.9. В период зимней экспедиции 2001 г. были выполнены одновременные независимые измерения оптических параметров байкальской воды комплексом ASP-15 и прибором коллаборации NEMO (Италия) AC-9. На рис. 3 приводятся значения длины поглощения и показателя рассеяния байкальской воды, измеренные разными приборами в 2001 г. [5].

4. Лазерный источник света

Временная калибровка между гирляндами в кластере обеспечивается выделенными светодиодными источниками света. Однако межкластерные калибровки требуют более интенсивных источников света. Такой источник света был спроектирован и изготовлен на базе мощного лазера. Основным светоизлучающим элементом лазера на 1064 нм является легированный неодимом иттрий-алюминиевый гранат (YAG:Nd3+). Частота пучка удваивается в нелинейном кристалле до длины волны 532 нм. Накачка основного элемента обеспечивается лазерными светодиодами с длиной волны 808 нм. Энергия импульса достигает значения 0.37 мДж ($\sim 10^{15}$ фотонов), длительность вспышки составляет около 1 нс. На выходе лазерного луча установлен рассеиватель света, обеспечивающий изотропное излучение света в воде. Специальный датчик используется для контроля интенсивности выходного света. Регулировка интенсивности обеспечивается системой ослабления света. Программное обеспечение позволя-

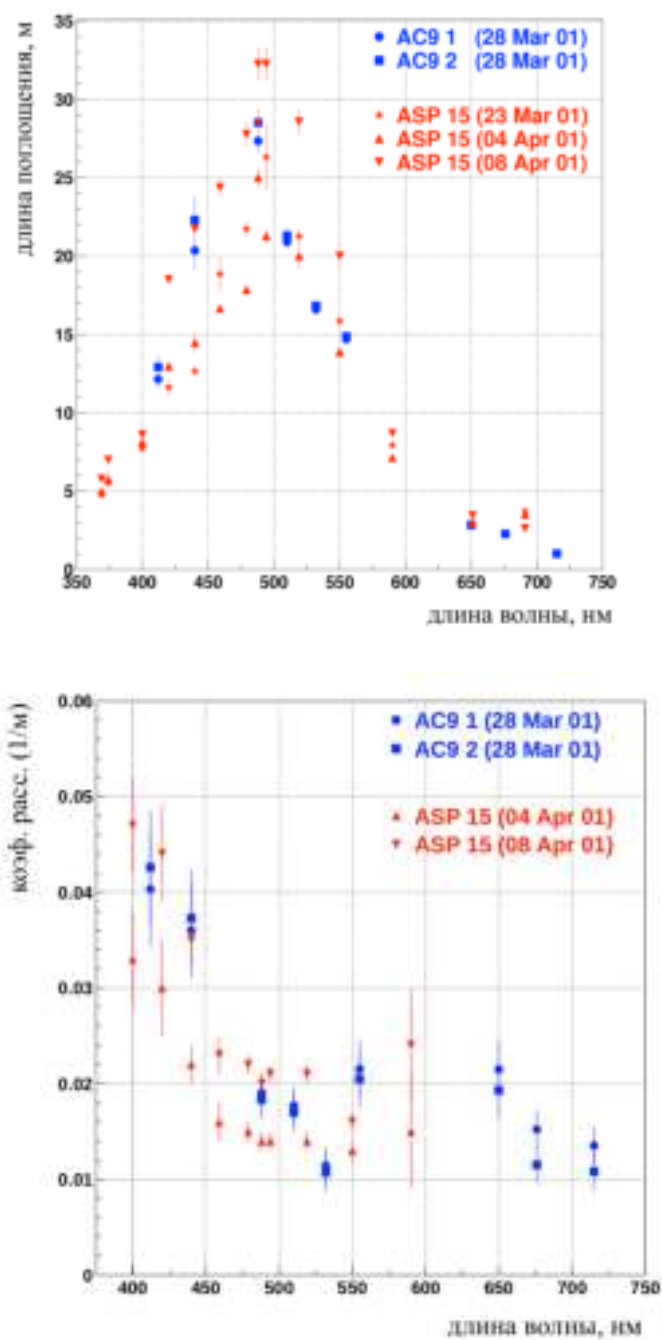


Рис. 3. Верхняя панель – спектральная зависимость длины поглощения байкальской воды на глубине 1000 м. Нижняя панель – спектральная зависимость показателя рассеяния байкальской воды на глубине 1000 м

ет работать в разных режимах, изменяя количество, частоту и мощность вспышек света во время свечения. Лазер установлен примерно на одинаковом расстоянии от трех кластеров и на той же глубине, что и центр нижних секций.

5. Моделирование отклика оптического модуля

Мощный лазерный источник света засвечивает более половины ОМ в кластере. Оптические модули находятся как ниже горизонта расположения источника, так и существенно выше него. Поэтому имеется возможность кроме длины поглощения света в воде также измерить длину рассеяния света в воде и относительную угловую чувствительность ОМ при разных углах падения света на ФЭУ.

Первым шагом в данных измерениях является моделирование распространения света с заданной длиной волны от изотропного источника света в толще байкальской воды с заданными оптическими характеристиками и с учетом процесса регистрации света оптическим модулем. Моделирование используется главным образом для того, чтобы учесть влияние рассеяния света, которое аналитически описывается только лишь в асимптотических случаях.

Для этого была адаптирована программа, используемая и созданная в рамках Байкальского эксперимента и моделирующая отклик ОМ на черенковское излучение мюонов, к случаю монохроматического точечного изотропного источника. В результате работы программы был получен следующий массив среднего числа фотоэлектронов, выбитых на ФЭУ ОМ, светом от источника с интенсивностью 10^8 фотонов:

$$\bar{n}_{p.e.}(\cos \psi, t, r), \quad (5)$$

где $\cos \psi$ – косинус угла падения света относительно ориентации ОМ; t – время регистрации света относительно времени появления нерассеявшихся фотонов от источника; r – расстояние от источника до ОМ. Среднее число фотоэлектронов $\bar{n}_{p.e.}$ было промоделировано для расстояний от 0.5 м до 299.5 м с шагом в 1 м,

для 30 значений углов падения света в диапазоне от 0 до 180 градусов включительно и для времен от 0 до 200 нс с шагом в 1 нс, причем последний 201-й элемент массива соответствует временам $t > 200$ нс. Для того чтобы получить $\bar{n}_{p.e.}$ для любых значений $\cos \psi$ и r , в заданных диапазонах используется кусочно-линейная аппроксимация между дискретными значениями массива.

В случае без учета рассеяния $\bar{n}_{p.e.}$ вычисляется по простой формуле:

$$\bar{n}_{p.e.} = I \cdot q_e \cdot f(\psi) \cdot e^{-r/r_a} / (4\pi r^2), \quad (6)$$

где I – интенсивность источника; q_e – квантовая эффективность ОМ, складывающаяся из квантовой эффективности ФЭУ и коэффициента ослабления света в стеклосфере и оптическом геле ОМ; r_a – длина поглощения света в воде; $f(\psi)$ – относительная угловая чувствительность оптического модуля.

На рис. 4 и 5 представлен результат моделирования прохождения света излученным изотропным монохроматическим источником света с интенсивностью 10^{14} фотонов, в водной среде с длиной поглощения света $r_a = 17.2$ м, длиной рассеяния света $r_s = 30$ м и средним косинусом угла рассеяния 0.9 в виде зависимости среднего числа ф.э. $\bar{n}_{p.e.}$ от расстояния между источником и приемником. Для сравнения на этом же рисунке приведен расчет по формуле (6). Квантовая эффективность ОМ q_e равна 0.17. Из рис. 4, 5 видно, что в случае повернутого ОМ строго на источник влияние рассеяния света приводит к постепенному уменьшению $\bar{n}_{p.e.}$ относительно случая без учета рассеяния и достигает 3.2 раз на расстоянии 300 м от источника и в 1.7 раза в случае отвернутого ОМ от источника. Также стоит заметить, что на расстояниях меньше 190 м влияние рассеяния приводит к большему количеству зарегистрированного света на отвернутом от источника ОМ.

Тем самым, влияние рассеяния особенно заметно в случаях отвернутых от источника ОМ, а также на расстояниях больше 150–200 м от источника и описано количественно с помощью моделирования, что позволяет разделить задачи определения длины погло-

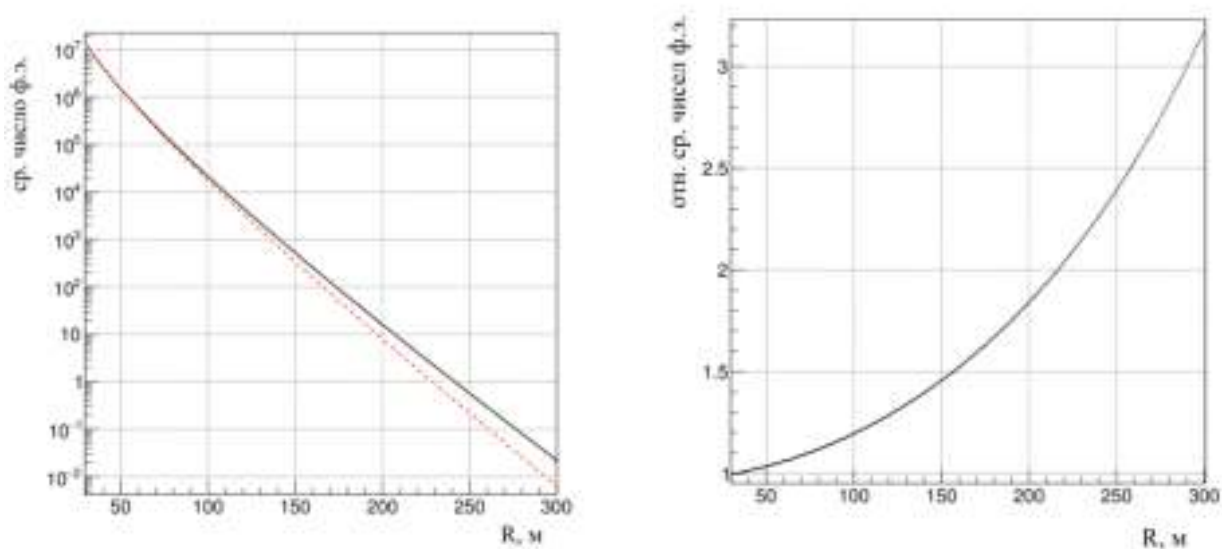


Рис. 4. Слева: среднее число ф.э. $\bar{n}_{p.e.}$, выбитых на ФЭУ ОМ, в зависимости от расстояния от ОМ до источника. ОМ повернут строго на источник. Расчет по формуле (6) (сплошная линия), результат моделирования прохождения света в среде (пунктирная линия). Справа: отношение $\bar{n}_{p.e.}$, полученного по формуле к $\bar{n}_{p.e.}$, полученного с помощью моделирования

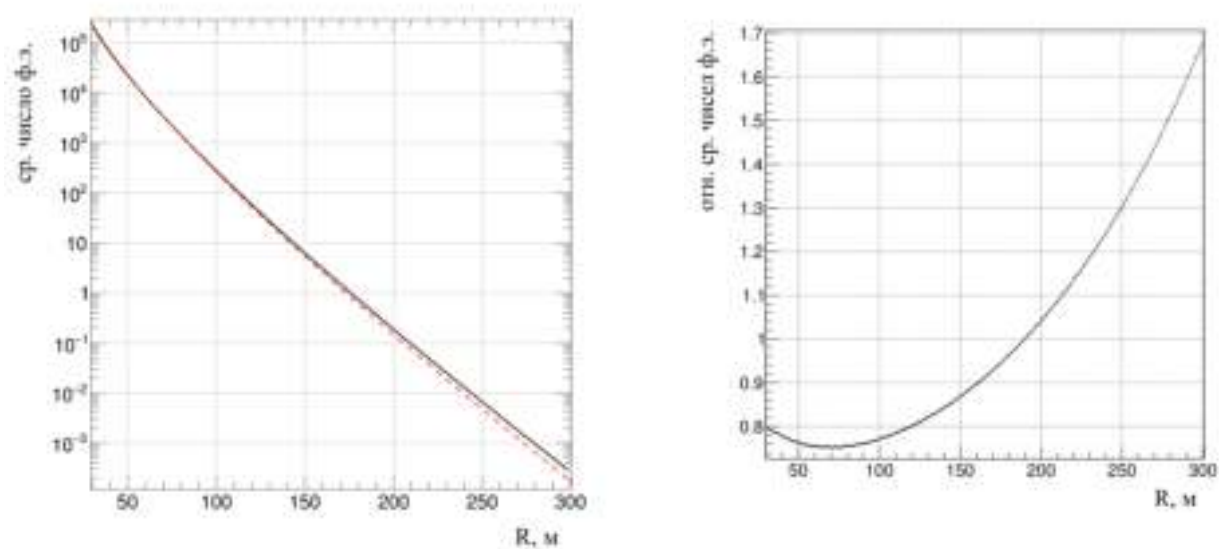


Рис. 5. Слева: среднее число ф.э. $\bar{n}_{p.e.}$, выбитых на ФЭУ ОМ, в зависимости от расстояния от ОМ до источника. ОМ полностью отвернут на источник. Расчет по формуле (6) (сплошная линия), результат моделирования прохождения света в среде (пунктирная линия). Справа: отношение $\bar{n}_{p.e.}$, полученного по формуле к $\bar{n}_{p.e.}$, полученного с помощью моделирования

щения и длины рассеяния света в воде путем соответствующей выборки оптических модулей.

Заключение

В данной статье были представлены первые сравнительные результаты распространения света от изотропного монохроматического источника сквозь водный объем детектора НТ1000 с учетом и без учета рассеяния света, а также был дан краткий обзор оптических свойств Байкальской воды, черенковского излучения, Байкальского глубоководного нейтринного телескопа и лазерного источника света.

Библиографический список

1. Avrorin A.D. Gidation Volume Detector in Lake Baikal: status of the project // Pos(NEUTEL2017) 063. P. 1–5.
2. Avrorin A.D. Baikal-GVD: status and prospects // Conference proceedings for QUARKS2018. arXiv:1808.10353 [astro-ph.IM]. 2018. P. 1–3.
3. Научно-Технический Проект Глубоководного Нейтринного Телескопа Кубокилометрового Масштаба на оз. Байкал // Москва-2010. P. 18–30.
4. Джилкибаев Ж.-А.М. Влияние оптических параметров среды на эффективность регистрации одиночных мюонов в глубоководных мюонов в глубоководных экспериментах // Препринт ИЯИ-1068/2001. P. 5–11.
5. Balkanov V., Bezrukov L., Belolaptikov I. et al. Simultaneous measurements of water optical properties by AC9 transmissometer and ASP-15 inherent optical properties meter in Lake Baikal // Nucl. Inst. & Meth. A. 2003. V. 498. P. 231–239.

*Поступила в редакцию
26.12.2019*