

*Т. Ж. Оразгали*

## Об измерении оптических характеристик водной среды Байкальского нейтринного телескопа

*С 2015 г. на озере Байкал развертывается 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.orazgali@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 см<sup>2</sup>) япон-

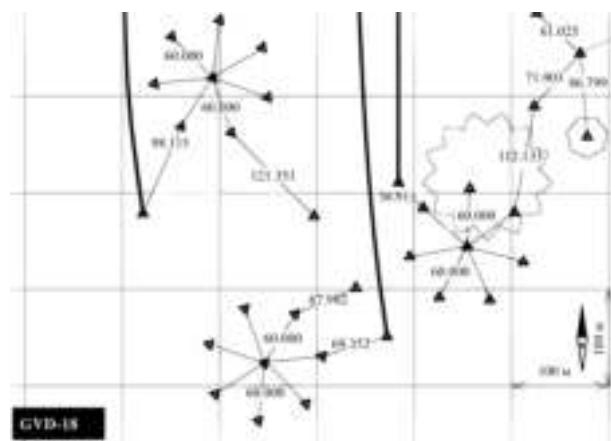


Рис. 1. Схематический вид нейтринного телескопа



Рис. 2. Внешний вид оптического модуля

ской фирмы *Namatatsu*, 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 индустриальный пятиштырьковый разъем, через который производится питание модуля, его управление и получение с него данных.

Оптический модуль устанавливаются на вертикальные груzonесущие 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 fotoумножителей, 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  $\theta_C$ , определенный выражением

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

где  $n$  – показатель преломления среды;  $\beta$  – скорость частиц в единицах с. 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  $N_\gamma$ , излучаемых на единицу длины волны  $d\lambda$  и пройденное расстояние  $dx$  заряженной частицей заряда  $e$ , определяется выражением

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

где  $\lambda$  – 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 fotoумножителя 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  $3.5 \times 10^4$ .

### 3. Оптические свойства воды озера Байкал

Основными оптическими параметрами, определяющими распространение света с длиной волны  $\lambda$  в прозрачных средах, являются показатель поглощения  $a(\lambda)$ , показатель рассеяния  $\sigma(\lambda)$ , индикатор рассеяния  $\chi(\mu, \lambda)$  ( $\mu = \cos(\theta)$ ,  $\theta$  – 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]).

Индикатора рассеяния выражается через дифференциальное сечение рассеяния:

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

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

Индикатора 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 межклusterные 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:Nd<sup>3+</sup>). 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 ( $\simeq 10^{15}$  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 позволяет

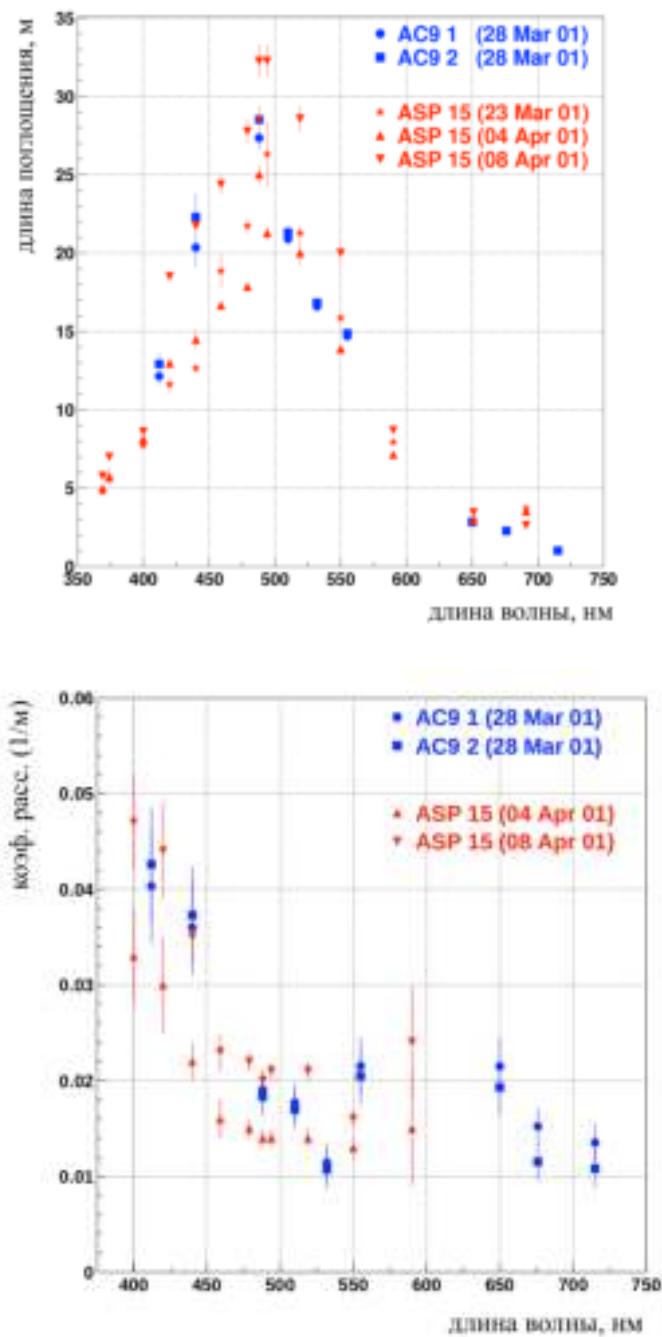


Рис. 3. Верхняя панель – спектральная зависимость длины поглощения байкальской воды на глубине 1000 м. Нижняя панель – спектральная зависимость показателя рассеяния байкальской воды на глубине 1000 м

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 за-свечивает 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 нерассеянных 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-

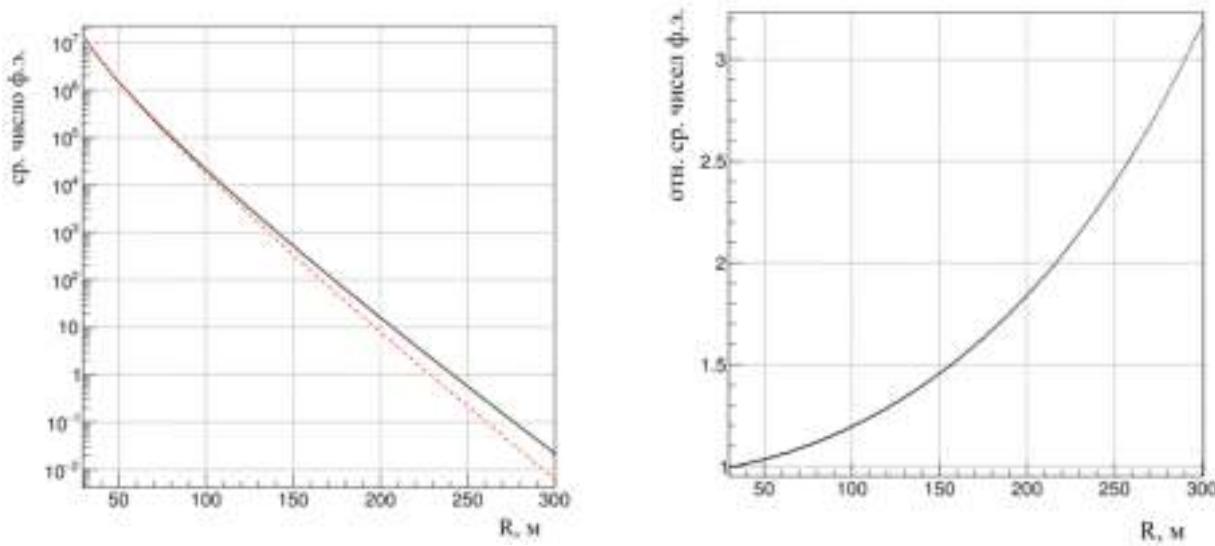


Рис. 4. Слева: среднее число ф.э.  $\bar{n}_{p.e.}$ , выбитых на ФЭУ ОМ, в зависимости от расстояния от ОМ до источника. ОМ повернут строго на источник. Расчет по формуле (6) (сплошная линия), результат моделирования прохождения света в среде (пунктируя линия). Справа: отношение  $\bar{n}_{p.e.}$ , полученного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

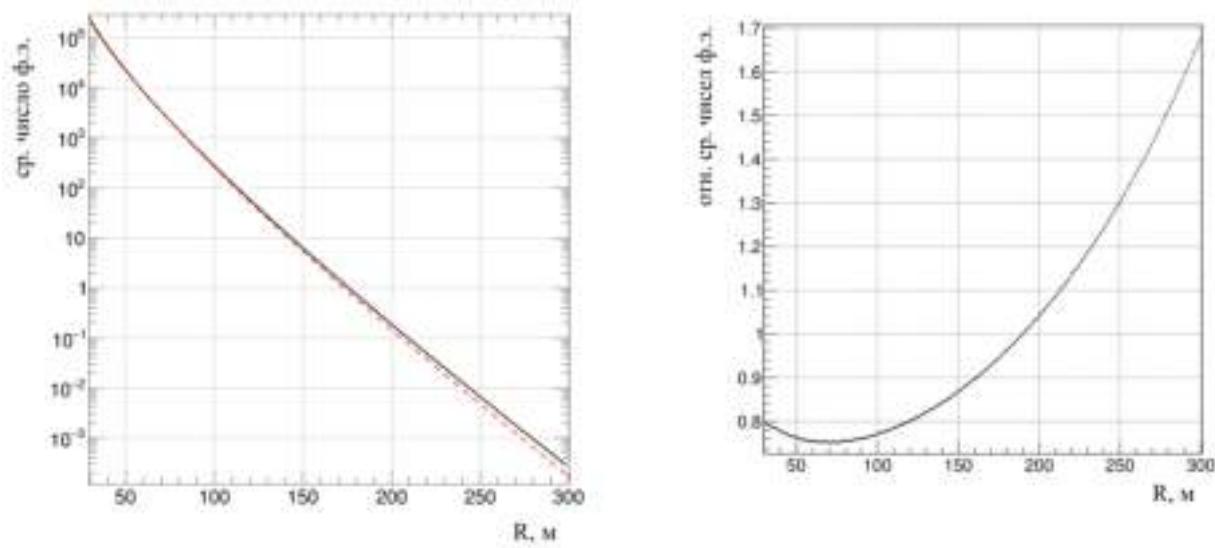


Рис. 5. Слева: среднее число ф.э.  $\bar{n}_{p.e.}$ , выбитых на ФЭУ ОМ, в зависимости от расстояния от ОМ до источника. ОМ полностью отвернут на источник. Расчет по формуле (6) (сплошная линия), результат моделирования прохождения света в среде (пунктируя линия). Справа: отношение  $\bar{n}_{p.e.}$ , 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. Р. 1–3.
3. Научно-Технический Проект Глубоководного Нейтринного Телескопа Кубокилометрового Масштаба на оз. Байкал // Москва-2010. Р. 18–30.
4. Джилкибаев Ж.-А.М. Влияние оптических параметров среды на эффективность регистрации одиночных мюонов в глубоководных мюонах в глубоководных экспериментах // Препринт ИЯИ-1068/2001. Р. 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